

2014年度 修士論文

Belle II 実験用粒子識別装置 (A-RICH) で使用
される光検出器と読み出しASICの性能評価

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻

修士課程2年 13879336

吉田 圭佑

平成27年1月9日

概要

茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で 1999 年から 2010 年まで運転した Belle 実験は、電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 KEKB 加速器により大量の B 中間子対を生成し、その崩壊事象を観測することで自発的な CP 対称性の破れの検証をはじめ、素粒子物理学における数多くの成果を挙げた。その一方で Belle 実験では統計量によって測定精度に大きな制限を受け、標準理論を破る物理自称を観測することはできなかった。Belle 実験の後継実験として、標準模型を超えた新物理の探索に向け Belle II 実験が計画された。

BelleII 実験では KEKB 加速器は SuperKEKB 加速器へ、また Belle 検出器を Belle II 検出器へとアップグレードをすることで従来の 40 倍のルミノシティを達成し、大統計を用いて標準模型による予測からの差異を観測することで標準模型の枠組みを超える物理事象の探索を行う。Belle II 検出器は 7 つの検出器からなる複合型検出器である。その中でも Endcap 部と呼ばれる領域で荷電 π 中間子と荷電 K 中間子の識別を行う Aerogel RICH (Ring Imaging Cherenkov) 検出器 (通称: A-RICH) は、Belle II 実験で特に重要な B 中間子のフレーバー同定において重要な役割を果たす π 中間子と K 中間子の識別を行う装置である。A-RICH では粒子識別可能なエネルギー領域を従来から $0.5 \text{ GeV}/c < p < 4.0 \text{ GeV}/c$ まで広げることができる。A-RICH は輻射体であるシリカエアロゲルと 144 チャンネルを持つ光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo detector) から構成される。荷電粒子がシリカエアロゲルを通過した際に発生するリング状の Cherenkov 光を後段の HAPD でリングイメージとして検出し、粒子によって異なるリング半径の差から粒子識別を行う。

A-RICH は 合計で約 6 万チャンネルを要する。それに伴い多チャンネルの同時読み出しが可能で、各チャンネル毎の単光子検出に必要な高利得、低雑音の読み出し回路が必要とされた。そこで Belle II 実験 A-RICH 検出器開発グループは専用の読み出し ASIC (application specific integrated circuit) を開発した。開発は 2004 年より進められてきたが、Belle II 実験での実装を想定した ASIC を試作し、その性能評価を行っていた。この ASIC は増幅器、波形整形、オフセット調節機能、比較器の機能を持ち、信号の有無となるデジタル情報のみを出力する。

2014 年 3 月に終了した ASIC の量産では 2520 個を作成し、その中から実機で使用する 1620 個を判定する必要がある。そのため ASIC が持つ機能の性能を評価項目とした検査システムの開発を行った。その結果から実機で使用する良品の判定を行った。ASIC からの情報はヒットの有無であるデジタル情報であるが、Threshold scan という測定方法により信号のアナログ情報を得ることができる。検査システムでは Threshold scan の結果をもとに ASIC の持つ機能の評価を行った。

A-RICH で使用する光検出器 HAPD は 2002 年から浜松ホトニクス社 (株) と共同開発を行っており、真空管内部にピクセル化された Avalanche Photo Diode (APD) 計 144 チャンネルが内蔵されたマルチアノード型の光検出器であり、2013 年 8 月より A-RICH 検出器に用いるための HAPD の量産を開始した。量産版 HAPD は順次その性能評価を行っている。測定項目は HAPD に流れるリーク電流、ノイズ量、増幅率、2 次元ヒット分布、量子効率である。測定結果をもとに HAPD を選定し、最終的には 420 個が A-RICH で使用される。

本論文では 2014 年 3 月までに全数生産が完了した読み出し ASIC の大量検査試験の手法と検査結果について述べ、また A-RICH 検出器への実装に向けた HAPD の量産品の性能評価手法と 2014 年 12 月末までに完了した評価結果について論じるとともに Belle II 実験開始に向けた A-RICH 検出器の展望を明らかにする。

目次

1	序論	10
1.1	期待される新物理	10
1.2	B 中間子の物理・B ファクトリー実験	12
1.2.1	CP 対称性の破れの検証	12
1.2.2	B 中間子の物理	13
1.3	Belle II で期待される物理	17
1.3.1	CKM 行列の精密測定：Unitarity Triangle	17
1.3.2	超対称性理論の検証	18
1.3.3	$b \rightarrow s\gamma$ 崩壊	19
1.3.4	新たなハドロンの探索	19
1.3.5	$b \rightarrow \tau\nu$ 崩壊における荷電ヒッグス粒子探索	20
2	Belle II 実験	21
2.1	SuperKEKB 加速器	21
2.2	Belle II 検出器	25
2.2.1	PXD、SVD	25
2.2.2	CDC	27
2.2.3	TOP	28
2.2.4	Aerogel RICH	29
2.2.5	ECL	30
2.2.6	KLM	31
2.2.7	データ収集システム	32
3	Aerogel RICH の開発	34
3.1	開発背景	34
3.2	A-RICH の粒子識別原理	34
3.3	A-RICH の性能要求	37
3.3.1	シリカエアロゲル	38
3.3.2	HAPD	40
3.3.3	読み出しシステム	46
3.4	プロトタイプ A-RICH の性能評価	49
3.5	シミュレーションによる評価	51
4	読み出し ASIC の性能評価	52
4.1	読み出し ASIC 「SA シリーズ」の概要	52
4.2	SA01、SA02 の概要	56
4.3	SA03 の開発と性能の改良	56
4.4	SA03 の量産	59
4.4.1	検査システムの開発	60
4.4.2	検査システムのセットアップ	64

4.4.3	量産版 SA03 ナンバリング	65
4.4.4	不良チップ率の確認	66
4.4.5	性能評価方法	66
4.4.6	検査システムによる性能評価	69
4.4.7	接続不良によるパラメータダウンロードの失敗	73
4.4.8	測定結果まとめ	73
4.5	SA03 の選定	73
4.5.1	評価方法	73
4.5.2	評価結果	76
5	HAPD の量産と性能評価	78
5.1	HAPD の生産状況	78
5.2	量産版 HAPD の性能評価	78
5.2.1	電流測定	80
5.2.2	ノイズ測定	82
5.2.3	2次元ヒット分布	84
5.2.4	総増幅率測定	88
5.2.5	QE 測定	90
5.3	結果	93
6	A-RICH 開発の今後の予定	94
6.1	モニタリングシステムの開発	94
6.1.1	基礎試験	94
6.1.2	基礎試験結果	95
6.1.3	モニターシステム開発の今後	96
6.2	A-RICH 全体の予定	97
7	まとめ	98
A	小林・益川理論	100
B	SA03 測定結果のデータベース化	101
C	SA03 詳細測定	102

表目次

1.1	標準模型 (SM) と 超対称性理論 (MSSM) の対応	12
2.1	KEKB と SuperKEKB の主なビームパラメータ比較	23
2.2	Belle II データ収集システムの要求性能	33
3.1	代表的な輻射体とその物性値	39
3.2	HAPD の各種パラメータ	45
4.1	SA シリーズの設定可能なパラメータ一覧	55
4.2	検査ボードの設定電圧	65
4.3	ランダムサンプリングによる不良チップ率の確認	66
4.4	検査システム結果	73
4.5	定量的評価に使用した項目	74
4.6	選定結果	77
5.1	量産版 HAPD の到着数	78
5.2	HAPD の電気的特性	79
5.3	電流測定結果の内訳	82
5.4	ノイズ測定の内訳	84
5.5	2次元測定の場合	85
5.6	2次元ヒット分布測定の内訳	87
5.7	量産版判定結果	93
B.1	取得データとデータベース	102

図目次

1.1 高エネルギー加速器研究機構の鳥瞰図 10

1.2 penguin diagram の例 11

1.3 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を表す Feynman diagram の例 13

1.4 非対称エネルギーでの B 中間子生成とその崩壊の概念図。 14

1.5 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ を表す diagram。 15

1.6 Mixing-induced CP violation の概念図。 15

1.7 $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ における崩壊時間 Δt の分布 (上) と、その結果から得られた CP 非対称度 (下) 16

1.8 様々な実験データより制限された CKM パラメータ $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ をフィットした図 17

1.9 Belle と Babar による $b \rightarrow sq\bar{q}$ を含む崩壊モードを用いた $\sin 2\phi_1$ の値と世界平均 18

1.10 loop diagram を含む $B^0 \rightarrow \phi K_S$ のダイアグラム 19

1.11 $b \rightarrow s\gamma$ 遷移における loop diagram 19

1.12 $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊と予想されるヒッグスの寄与 20

1.13 CKMfitter グループによる Belle・Babar による $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊分岐比の測定値と世界平均 [9] 20

2.1 世界各地の衝突型加速器フロンティア 22

2.2 SuperKEKB の概要図 22

2.3 SuperKEKB 完成後の積分ルミノシティの推移予想図 (上)。到達ルミノシティの推移予想図 (下)。 24

2.4 Belle II 検出器完成イメージ 25

2.5 完成イメージ、検出範囲はビーム軸から角度で $17^\circ \sim 150^\circ$ 26

2.6 (a) は PDX 用 DEPFET、(b) は SVD 用 DSSD の構造 26

2.7 CDC による荷電粒子のエネルギー損失 27

2.8 実際のワイヤー張り作業の様子 (左)。 CDC の断面図 (右上)。スモールセルとノーマルセルの大きさの比較 (右下)。 28

2.9 (a) は DIRC の検出原理。(b) は TOP モジュールの概念図。 28

2.10 クォーツ 29

2.11 MCP-PMT 29

2.12 Aerogel RICH の設計図 30

2.13 ECL の構成 31

2.14 KLM の設置図 32

2.15 Endcap 部 KLM の構成要素 32

2.16 Bell II データ収集システムの概観図。 33

3.1 RICH の基本構成とリングイメージ検出方法の概念図 35

3.2 RICH の構成による分類 36

3.3 (a) 輻射体 1 枚の単層。(b) 輻射体 2 枚の複層 での Cherenkov 放射を表した図 37

3.4 シリカエアロゲルの内部構造 38

3.5 シリカエアロゲルの外観 38

3.6	荷電 K/π の運動量と輻射体の屈折率の関係	39
3.7	シリカエアロゲル:実機使用のサイズ ($18 \times 18 \times 2 \text{ cm}^2$)	40
3.8	左図は実際の 144ch マルチアノード型 HAPD。右図はその寸法。	41
3.9	HAPD の構造	41
3.10	APD の動作原理	41
3.11	最低次の Radiative Bhabha 散乱のダイアグラム	42
3.12	中性子線による半導体内結晶損傷の仕組み	43
3.13	HAPD 構造図	44
3.14	HAPD のチャンネル配置とピン配置	44
3.15	HAPD の波高分布の例。	45
3.16	HAPD の量子効率の波長依存性	46
3.17	Belle II 検出器の断面図と A-RICH の設置位置	47
3.18	読み出しシステム概念図	47
3.19	Front-end board 内部の電子回路の構成	48
3.20	FE board と Merger board	49
3.21	ビームテストの実際のセットアップ外観図	50
3.22	プロトタイプ A-RICH のリングイメージ観測結果	50
3.23	シミュレーションによる A-RICH の性能評価結果	51
4.1	SA シリーズの基本回路構成	52
4.2	増幅器の動作シミュレーション	53
4.3	波形整形器の動作シミュレーション	53
4.4	オフセット調節回路の動作シミュレーション	54
4.5	比較器の動作シミュレーション	54
4.6	予想される中性子照射後の APD からのノイズ量	57
4.7	従来の SA シリーズと SA03 のシフトレジスタの構成の比較	58
4.8	SA03 ベアチップ (a) と各パッケージの外観 (b)(c)	59
4.9	LTCC キャビティ部 (左図) と間違ったサイズにカットされたベアチップ (右図)	59
4.10	検査ボード外観図	60
4.11	検査システムの通信概念図	61
4.12	メインボード内の DAC 付近の回路図	62
4.13	DAC 出力をモニターした結果	63
4.14	ソフトウェア改良後の DAC のステップに対応する出力電圧	63
4.15	MAC アドレス書き込みの様子	64
4.16	検査システムの実際の構成	65
4.17	耐熱ペン (a) と実際にシリアル番号を記述した様子 (b)	66
4.18	比較器に入力されるアナログ信号とその際の Threshold scan の結果	68
4.19	Threshold scan の結果を全 36 チャンネル同時に表した結果 (a)、1 チャンネルをプロジェクションした結果 (b)	69
4.20	オフセット調節結果。実線が粗調節、点線が微調節を表す。	70
4.21	SA03 の電源電流値とオフセット調節可動範囲の相関	70

4.22 SA03 内部回路	71
4.23 1チャンネルでの各増幅率の結果	72
4.24 増幅機能不良品の例	72
4.25 SA03 1 サンプルの各チャンネルの各増幅率分布 (a) 良品 (b) 不良品	72
4.26 評価方法概念図	75
4.27 良品 2081 個の粗調節によるオフセットレベルの度数分布	76
4.28 判定結果。閾値電圧毎の全 36 チャンネルで条件を満たす SA03 の数の推移。	76
4.29 判定 2 回目の結果	77
5.1 チップ電流測定セットアップの概観図	80
5.2 HAPD1 台の電流測定結果	80
5.3 チャンネル電流測定のセットアップ概念図	81
5.4 KEK 到着直後と 6 か月後でのチップ電流値の比較	82
5.5 電子顕微鏡で確認されたリーク電流増加サンプルの APD 表面	82
5.6 ノイズ測定のセットアップ概念図	83
5.7 ノイズ測定結果	84
5.8 2次元測定システムの概要	84
5.9 量産版 HAPD 2次元測定結果	85
5.10 (a) 側管での電場による歪みの影響、(b) 磁場の影響で電場の歪みを改善できる様子	86
5.11 ノイズが大きい領域があるサンプルの例	87
5.12 ノイズカウントの時間分布	87
5.13 レーザー照射時の Threshold scan 結果	88
5.14 測定結果による総増幅率の度数分布	89
5.15 総増幅率算出方法の違いによる結果の違いの確認。横軸が式 5.1、縦軸が式 5.2 による総増幅率。	89
5.16 HPK で測定された総増幅率と KEK で測定した総増幅率の比較。横軸は HPK の総増幅率、縦軸は KEK の総増幅率。	90
5.17 QE 測定のセットアップ	91
5.18 QE 算出方法概念図	91
5.19 QE 測定結果	91
5.20 対角線上に QE が低い領域があるサンプル	92
5.21 KEK 測定と HPK 測定での QE 測定値の相関	92
5.22 (a)KEK 測定及び (b)HPK 測定での HAPD の QE 分布	93
6.1 モニターシステム概念図。A-RICH 断面図を表している。A-RICH の有効半径は 60 cm である。	94
6.2 検出器位置依存性の検証で用いたセットアップ概念図	95
6.3 (a) 光量の位置依存性結果、(b) 光源を 7 cm 毎に設置した場合での光の1様性の検証	96
6.4 A-RICH モニターシステム用に開発された光ファイバー	96
6.5 A-RICH の開発スケジュール	97
A.1 Unitarity Triangle	101

C.1 より詳細な増幅率測定の結果 102

C.2 (a) 全 256 段階でのオフセット調節機能結果、(b) 微調節スロープの度数分布 103

C.3 4 段階の波形整形結果 104

1 序論

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 1999 年から 2010 年まで運転した Belle 実験は、電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 KEKB 加速器により大量の B 中間子対を生成し、その崩壊事象を観測することで自発的な CP 対称性の破れを検証し、小林・益川模型の証明を行った。また同時に、新たなハドロン共鳴状態の発見など新たな物理の兆候も観測し素粒子物理学における数多くの成果を挙げた。



図 1.1: 高エネルギー加速器研究機構の鳥瞰図

Belle 実験は素粒子物理学において多くの貢献を果たしたが、より効率良く、かつ高精度な測定を行うための後継実験 Belle II 実験がある。

この章では、新物理探求へのアプローチについて紹介し、Belle II 実験の物理的背景となる B 中間子系の物理や B ファクトリー実験について、Belle II 実験で期待される標準模型を超える新物理の解説を行う。そして Belle II 実験で期待される新物理の可能性について述べ、いくつかの重要な観測モードの例を挙げて粒子識別検出器の重要性について解説する。

1.1 期待される新物理

小林・益川理論により標準模型の範囲内で CP 対称性の破れが説明できることが Belle 実験により証明された。しかし、標準模型に含まれる重力や電磁相互作用の階層性問題の発見・解決には至らなかった。これらは標準模型を超えた新たな物理によって説明されると期待された。スイス・フランスに設置された大型ハドロン衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) はこの新物理から予言される新粒子を直接観測すべく TeV オーダーで衝突実験を行っている。そして 2012 年 7 月に標準模型の中で唯一未発見であった Higgs 粒子が LHC による ATLAS 実験・CMS 実験で発見され標準模型がより理解された。しかしな

がら、標準模型を超える物理は見つかっていない。

新物理の候補となる模型はいくつか提案されているが、ここでは Belle II 実験において検証が期待される超対称性理論について述べる。

超対称性理論

新物理の候補として最も有力視されているのが超対称性理論 (**Super Symmetry theory : SUSY**) である。この理論は素粒子論だけでなくダークマター候補となる粒子を预言しているため宇宙論とも親和性が高いことから最も期待されており、多くのモデルが提唱されている。

フェルミオンとボソンというスピン統計に対し新たな対称性として“超対称性”を課すことで全てのフェルミオンやボソンに対し超対称性パートナー粒子を预言することができる。超対称性理論が正しければ、素粒子の数は一気に二倍に増えることとなる。半整数スピンをもつクォークやレプトンといった物質粒子にはスピンを持ったスクォーク (squark : \tilde{q})、スレプトン (slepton : \tilde{l}) が、一方整数スピンをもつゲージボソンや Higgs 粒子 (スピン 0) には半整数のゲージフェルミオン (gaugino) やヒグシーノ (Higgsino: \tilde{h}) が预言される。標準模型を最も、最小限に超対称化した理論を Minimal Super symmetric Standard Model (MSSM) と呼ぶ。表 1.1 に標準模型に含まれる粒子と MSSM で導入される超対称性パートナー粒子をまとめた。SUSY の導入により、標準模型で問題となっている Higgs 粒子の質量問題 (Fine Tuning Problem) の解決が期待されている。Higgs 粒子の質量は量子補正による 2 次発散の影響で自身の質量スケール 100 GeV 付近よりはるかに大きくなってしまいが、超対称性パートナー粒子である \tilde{h} を導入することで、逆符号の補正がかかり量子補正を相殺し解決することができる [1]。

超対称性パートナー粒子は標準模型に含まれる粒子の反応に対し高次の loop として関与すると期待されている。例としては penguin diagram によって引き起こされる Flavor Changing Neutral Current (FCNC) がある (図 1.2)。これは tree diagram では起きないことが標準模型で保障されている。しかし、新物理が高次の loop diagram を介して関与することで観測が可能であると预言されている。

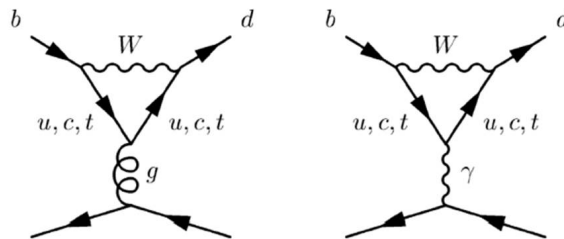


図 1.2: penguin diagram の例。左図は gluon を介する QCD penguin, 右図は光子を介する EW (electroweak) penguin と呼ばれる。どちらも中性カレントによって $b \rightarrow d$ へとフレーバが変化しているため、FCNC 崩壊だと考えられる。 W の代わりに荷電 Higgs や新物理で预言される粒子が関与すれば、その効果が崩壊比などに現れるはずである。

B 中間子の崩壊に注目すると、標準理論の枠組みにおいては崩壊分岐比が小さく、特に FCNC を含む崩壊 $b \rightarrow sg$ 、 $b \rightarrow dg$ (g はグルーオン) は超対称性パートナー粒子の寄与

表 1.1: 標準模型 (SM) と 超対称性理論 (MSSM) の対応

既存の粒子			超対称性粒子		
$S=1/2$	lepton	e, μ, τ	$S=0$	slepton	$\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$
	neutrino	ν_e, ν_μ, ν_τ		sneutrino	$\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$
	quark	u, c, t d, s, b		squark	$\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}$ $\tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{b}$
$S=1$	photon	γ	$S=1/2$	photino	$\tilde{\gamma}$
	Weak Boson	W^\pm, Z^0		Wino	$\tilde{W}^\pm, \tilde{Z}^0$
	gluon	g		gluino	g
$S=0$	Higgs	h, H, A^0, H^\pm	$S=1/2$	Higgsino	$\tilde{H}_1, \tilde{H}_2, \tilde{H}^\pm$
$S=2$	Graviton	G	$S=3/2$	Gravitino	\tilde{G}

が非常に敏感であると期待されている。

1.2 B 中間子の物理・B ファクトリー実験

1.2.1 CP 対称性の破れの検証

1956年に T.D.Lee と C.N.Yang は原子核の β 崩壊において空間反転 (P)、更に荷電共役変換 (C) が破れているのではないかという仮説を立てた。その後 C.S.Wu らのグループによってその仮説は実験的に実証された。しかし空間反転 (P) と荷電共役変換 (C) を続けて行う (CP) 変換は破れていないと考えられていた。

1964年に J.W.Cronin, V.L.Fitch らが中性 K 中間子系の CP 固有状態の 1 つ K_L が CP 対称性のため通常は崩壊しないと思われていた 2π (CP even) への崩壊をわずかに含み事を観測し、世界で初めて K 中間子系における CP 対称性の破れを実証した。

1973年に小林誠と益川敏英によって提唱された小林・益川モデルはそれまで u, d, s クォークのみからなる系の観測結果とは矛盾せずに標準模型の範囲で説明でき、このモデルではクォークの CP 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た [3]。したがって、CKM 行列のパラメータとして有限の複素位相が存在することを実験的に検証するため Belle 実験や Barbar 実験など B ファクトリー実験と呼ばれる実験が計画された。

特に b クォークに関する行列要素 (V_{tb}) が比較的大きい値になることが予言され、 b クォークを含む B 中間子系における CP 非対称度は「非対称エネルギー衝突」という手法により検証が可能となった。非対称エネルギー衝突は異なる運動量を持った粒子を衝突させることで衝突後の系に Lorentz boost を生じさせ、 B 中間子と \bar{B} 中間子の間の差異を観測可能な領域まで相対論的に崩壊時間を延ばすという方法である。この手法を用い、非対称エネルギーで衝突させ B 中間子系での CP 対称性の破れを観測することを主な目的とした電子・陽電子衝突型加速器実験が **B ファクトリー実験** である。

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 実験である。1990 年代後半より建設が開始され、ともに 1999 年より実験を開始した。その結果、両グループは 2001 年のほぼ同時期に B 中間子系での CP 対称性の破れの観測を公表し、小林・益川模型を世界で初めて実験的に証明することに成功した。両実験は、Babar 実験が先に 2008 年に実験終了となり、Belle 実験も 2010 年をもって運転を終了した。

1.2.2 B 中間子の物理

小林・益川模型の検証を主目的とした B ファクトリー実験は b 、 \bar{b} を対生成によって「工場」のように大量生成し、両者の振る舞いを精密に測定する。ただし、クォークは単独で取り出すことはできないので中性 B 中間子と反 B 中間子として生産する。B 中間子の生成方法は、 e^+e^- 対消滅によって生じる $\Upsilon(4S)=(b\bar{b})$ という bottomonium 共鳴状態が $B^0\bar{B}^0$ に崩壊することを利用する。中性 B 中間子は反中性 B 中間子と常に入れかわっている。これを $B^0 - \bar{B}^0$ 混合 (mixing) と呼ぶ。(図 1.3)。このような過程を box diagram と呼ぶ。

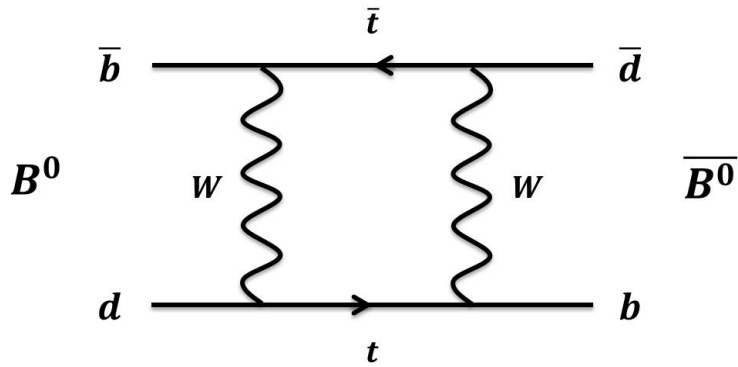


図 1.3: $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を表す Feynman diagram の例。

$\Upsilon(4S)$ の質量は $m \simeq 10.58 \text{ GeV}/c^2$ なので、衝突エネルギーは重心系でこのエネルギーになるように設定されている。KEKB 加速器では B-factory 実験のと特徴である非対称エネルギー衝突のため、 e^- は $8.0 \text{ GeV}/c$ 、 e^+ は $3.5 \text{ GeV}/c$ という運動量に加速していた。この非対称エネルギーによって衝突後の系に $4.5 \text{ GeV}/c$ 程度の運動量を与えることができる。この運動量を得た $B^0 - \bar{B}^0$ 対は図 1.4 のように終状態へ崩壊していく。

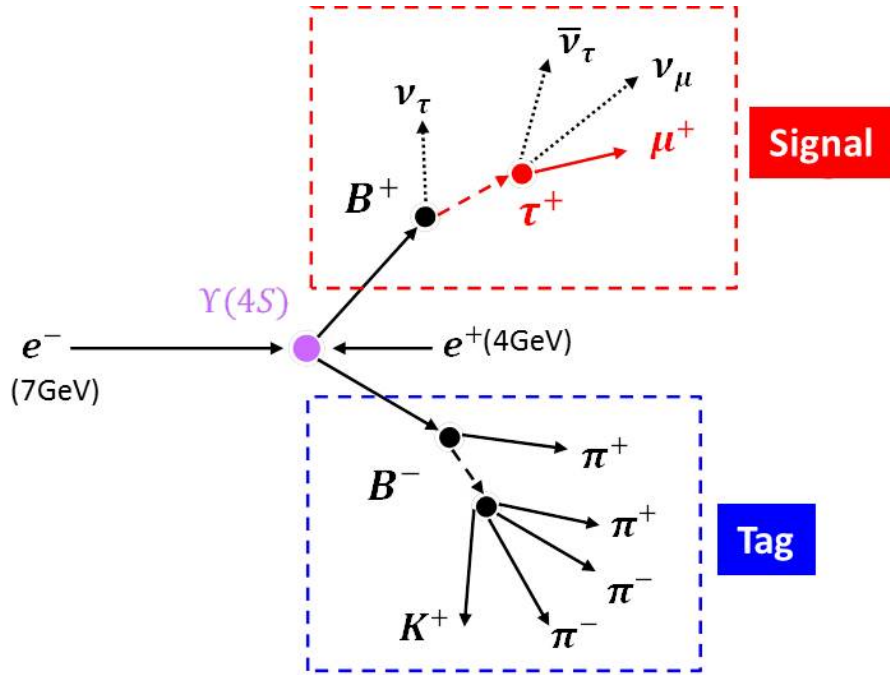


図 1.4: 非対称エネルギーでの B 中間子生成とその崩壊の概念図。

ここで B^0 から \bar{B}^0 からも崩壊が可能な状態を考える。例えば図 1.5 のような tree diagram を経て CP 固有状態である $J/\psi K_S$ へと崩壊するモードである。このモードでは、 B^0 中間子が崩壊する経路は 2 種類ある。 B^0 が図 1.5 上図のようにそのまま崩壊する場合と、box diagram を介して混合してから崩壊する図 1.5 下図のような崩壊である。見かけ上は同じ終状態なので、親となる B 中間子が B^0 か \bar{B}^0 かを同定することは、終状態からだけでは同定は不可能である。そこで親を同定するため、注目している CP 固有状態 $f_{CP} = \psi K_S$ に崩壊する方 (これを signal side と呼ぶ) ではなく、その反対側が完全に同定できる時の崩壊 (これを tag side と呼ぶ) を正確に観測することで tag side の親を同定する方法を用いる。このような崩壊した B 中間子が B^0 であったか \bar{B}^0 であったかを知る測定をフレーバータギングと呼ぶ。図 1.4 では B^0 側を signal side とし、反対側を \bar{B}^0 と同定していることを示している。tag side の B^0 から崩壊した荷電粒子 $\bar{D}^0 (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 、 π^- 、 μ^+ は CP 固有状態ではないので、それ以外の量子数から親が B^0 と同定することが可能であり、signal side の親も確実に \bar{B}^0 だと同定することができる。

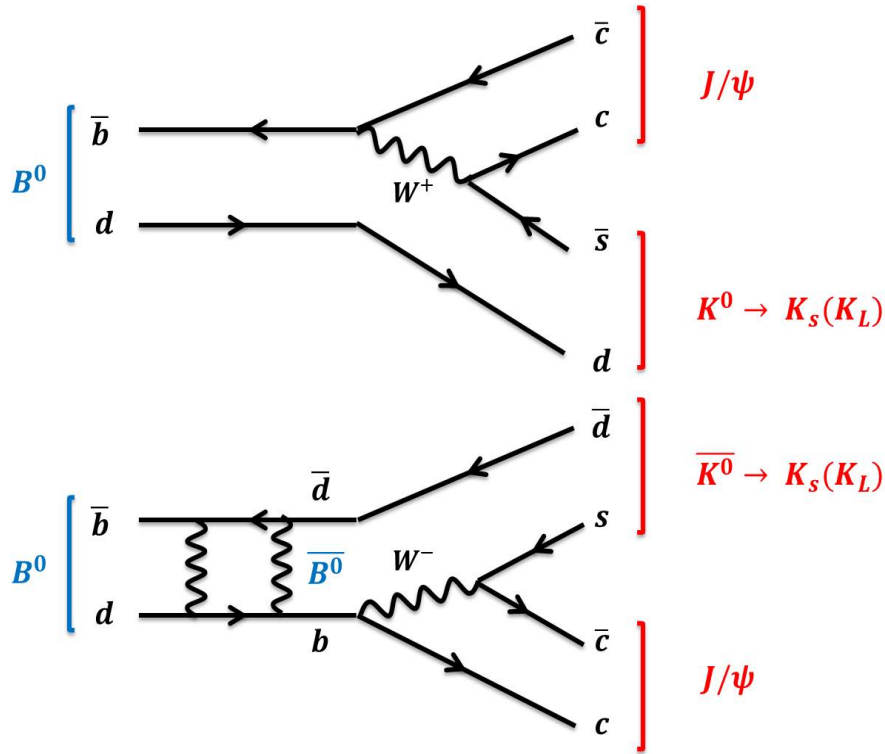


図 1.5: $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ を表す diagram。上図が B^0 から直接終状態へと崩壊するモード。下図が box diagram を開始して \bar{B}^0 へと遷移してから崩壊するモード。 K^0/\bar{K}^0 中間子は B 中間子と同じように混合を起こして、 K_S 中間子または K_L 中間子になる。

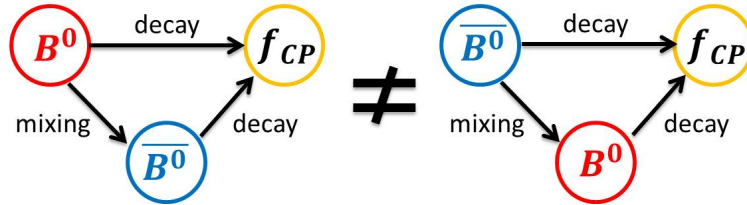


図 1.6: Mixing-induced CP violation の概念図。どちらも同じ終状態に崩壊するモード。親が B^0 と \bar{B}^0 の場合で崩壊確率に差が生じるかを実験的に観測する。

図 1.5 のように同じ状態に 2 つの経路で遷移が可能な場合、量子力学的に 2 つの経路の間に干渉が起こる。この干渉の効果によって、 B^0 中間子が崩壊する場合と \bar{B}^0 が崩壊する場合で崩壊率が異なる。このような混合を通じて CP 非対称性が観測される現象を CP 非保存 (mixing-induced CP violation) と呼ぶ崩壊時間 t_{tag} の差 $\Delta t = t_{\text{sig}} - t_{\text{tag}}$ を用いて、崩壊確率は以下の式 1.1 で表される。

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

q は b クォークの電荷を表し親が B^0 の時 $q=+1$ 、 \bar{B}^0 の時 $q=-1$ 、 τ は B 中間子の寿命、

Δm は B^0 と \bar{B}^0 の質量差、 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。 ξ_f は終状態 f_{CP} で決まり、 $f_{CP} = J/\psi K_S$ の時 -1 、 $f_{CP} = J/\psi K_L$ のとき $+1$ である。 ϕ_1 は小林・益川行列の行列要素を含み $\phi_1 = \arg[-V_{cd}V_{cb}^*/V_{tb}V_{tb}^*]$ で定義される。これらから $J/\psi K_{S/L}^0$ への崩壊に表れる CP 非対称度 A_{CP} は以下のように崩壊時間に依存した式で表される [5]。

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

$\sin 2\phi_1$ は B^0 が $J/\psi K^0$ へと崩壊した時の崩壊時間分布と \bar{B}^0 が $J/\psi K^0$ に崩壊した時の崩壊時間分布の差 (図 1.7) から求めることができる。 $q = +1$ の赤いプロットが $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K^0$ 、 $q = -1$ の青いプロットが $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ と同定された時の結果である。

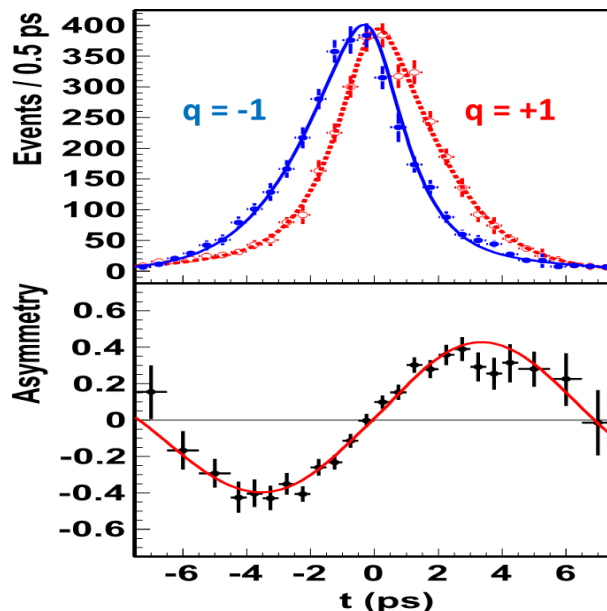


図 1.7: $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ における崩壊時間 Δt の分布 (上) と、その結果から得られた CP 非対称度 (下)。青と赤の差をとると \sin 曲線が得られる。この振幅が $\sin 2\phi_1$ に比例するので ϕ_1 を測定することができる [5]。

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 $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ 平面上に示すと図 1.8 のように Unitarity Triangle の角 ϕ_1 を決定することができる。また、 $\sin 2\phi_1$ の決定には今回示した $B^0 \rightarrow J/\psi K_{S/L}^0$ 以外のモードも利用することができる。図 1.9 に Belle 実験と Babar 実験が様々なモードで観測して得られた $\sin 2\phi_1$ の値をまとめる。

$\sin 2\phi_1$ の測定以外にも、様々な観測モードやほかの実験から得られた結果を組み合わせることで Unitarity Triangle の全ての角、辺の大きさの決定ことができ、現在の素粒子

実験の重要な動機となっている。以下に Belle, Babar で精密に測定された $\sin 2\phi_1$ の最新結果を示す [6]。

$$\sin 2\phi_1 = 0.667 \pm 0.023 \pm 0.012 \quad (1.3)$$

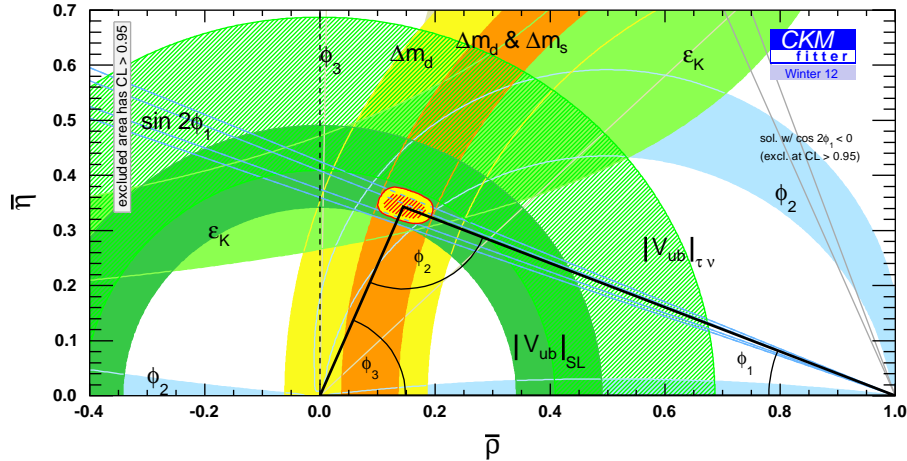


図 1.8: 様々な実験データより制限された CKM パラメータ $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ をフィットした図。三角形の角の大きさ、辺の大きさを精度よく求めることが B ファクトリー実験の目的の 1 つである。図は CKMfitter グループ [7] が 2012 年に公開したものである。

1.3 Belle II で期待される物理

Belle 実験では、 B 中間子系での CP 対称性の破れの観測など様々な測定結果が標準理論と一致する結果となった。一方で Belle 実験では統計量により測定精度が大きく制限され、標準模型を超える物理事象を観測することはできなかった。Belle II 実験では、Belle 実験の時に比べてより 40 倍のデータを精度良く測定することができる。これにより、標準理論からの「ズレ」を捕らえることができれば、提案されているどの理論が正しいのかを選別することが出来、新しい物理法則探索の突破口を開くことが出来る。以下では、Belle II に期待される新物理事象探索についていくつか紹介する。

1.3.1 CKM 行列の精密測定 : Unitarity Traiangle

Belle 実験により B 中間子系での CP 対称性の破れが観測され、小林・益川理論が正しいことが証明されたが、Belle II 実験ではさらに精密測定が行われる。具体的には小林・益川理論で扱われる、CP 対称性の破れを明示する Unitarity Triangle¹ の各角度と各辺の精密測定である。角度に関する観測モードは loop を含まないため新物理への関与が小さく、標準模型の範囲内で観測ができると期待されている。

¹詳細は付録

$$\sin(2\beta^{\text{eff}}) \equiv \sin(2\phi_1^{\text{eff}})$$

HFAG
Moriond 2014
PRELIMINARY

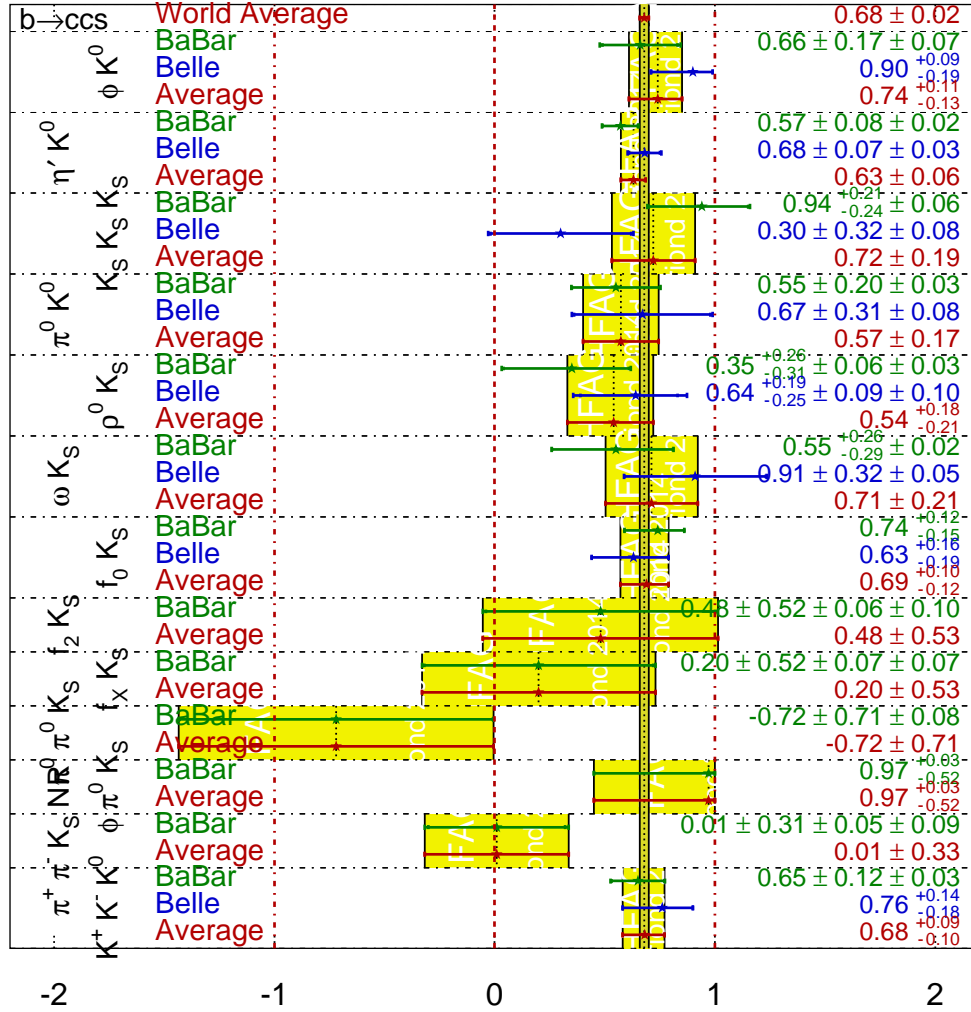


図 1.9: Belle と Babar による $b \rightarrow sq\bar{q}$ を含む崩壊モードを用いた $\sin 2\phi_1$ の値と世界平均。図は HFAG[8] で 2014 年 3 月に公開されたものである。

1.3.2 超対称性理論の検証

Belle II 実験で新物理の兆候を見るためには、まず CP 非対称度の時間依存性への寄与を調べるのが重要である。時間依存の CP 対称性の破れに新物理が関与する場合は penguin diagram を介するため、Belle 実験において Golden mode とされた $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ は tree diagram が支配的モードであるためあまり有効ではない。その代わりに

$$\begin{aligned} B^0 &\rightarrow \phi K_S \\ B^0 &\rightarrow \eta' K_S \end{aligned} \tag{1.4}$$

が loop diagram を含むため新物理に感度がある。図 1.10 に $B^0 \rightarrow \phi K_S$ のダイアグラムを示す。

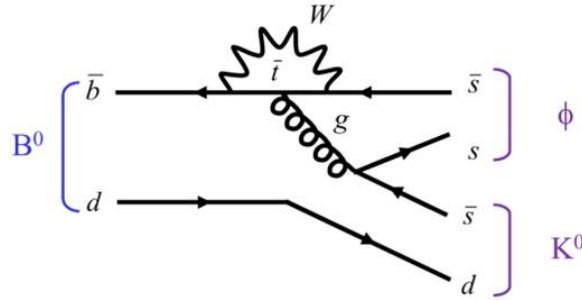


図 1.10: loop diagram を含む $B^0 \rightarrow \phi K_S$ のダイアグラム

1.3.3 $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊

$b \rightarrow s\gamma$ 遷移は標準模型の範囲内では tree diagram で禁止されているため、崩壊中に loop を介して観測される (図 1.11)。超対称性粒子はこの loop の中に現れる可能性があるため、この遷移を含む崩壊モードに関する崩壊分岐比や標準模型との非対称度の差が検証されると期待される。標準模型ではこの過程で出てくる光子はほぼ左巻きとなるが、新物理による右巻きカレントの寄与があれば時間に依存した CP 非対称度が現れると考えられている。この崩壊は $B \rightarrow X_S \gamma$ 崩壊中に現れるため、Belle II 実験ではこれらの崩壊モードを解析する必要がある。 X_S はストレンジネスを一つ含む終状態の総称を指す。 X_S は終状態として複数の K/π に崩壊するため、Belle II 実験では K/π 識別の識別向上が重要となってくる。

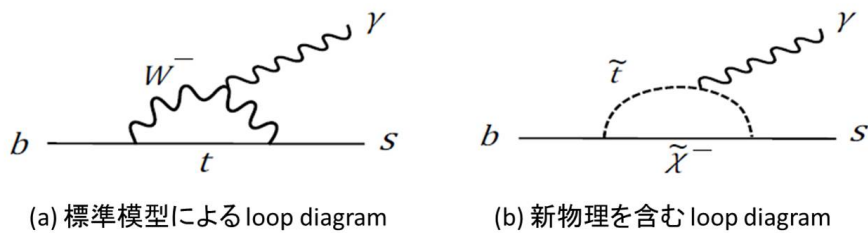


図 1.11: $b \rightarrow s\gamma$ 遷移における loop diagram

1.3.4 新たなハドロンの探索

Belle 実験では CP 対称性の破れの検証のほかにも新型ハドロンの発見といった成果が挙げられた。具体的には $X(3872)$ 、 $Y(4280)$ 、 $Z(4430)^+$ などのエキゾチックハドロンの

発見である。

Belle II 実験でのハドロン物理は、崩壊分岐比などの詳細測定からスピン、パリティなどの量子数を決定し、上記のエキゾチックハドロンの理解を進めるほか、多くの新粒子群が見つかる可能性が高く新物理の更なる理解が期待される。

1.3.5 $b \rightarrow \tau\nu$ 崩壊における荷電ヒッグス粒子探索

超対称性理論では標準模型で期待されたヒッグス粒子以外に中性ヒッグス (H^0) と荷電ヒッグス (H^\pm) の寄与が考えられ、 $B \rightarrow \tau\nu$ や $B \rightarrow D\tau\nu$ といった崩壊に強く現れる。これらは図 1.12 に示すような diagram で表され、 W^\pm の交換により起こる。もし荷電ヒッグスが存在するなら W^\pm の交換部分に寄与し崩壊分岐比が大きく変化すると考えられる。Belle 実験及び Babar 実験で測定された $B \rightarrow \tau\nu$ の崩壊分岐比の世界平均は、標準模型からの予想値よりも 1.6σ ほどずれている (図 1.13)[9]。この差が標準模型を超える新しい物理によるものと予想されるため、Belle II 実験では $B \rightarrow \tau\nu$ の測定精度を高める必要がある。

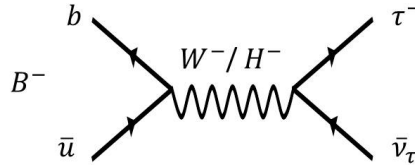


図 1.12: $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊と予想されるヒッグスの寄与

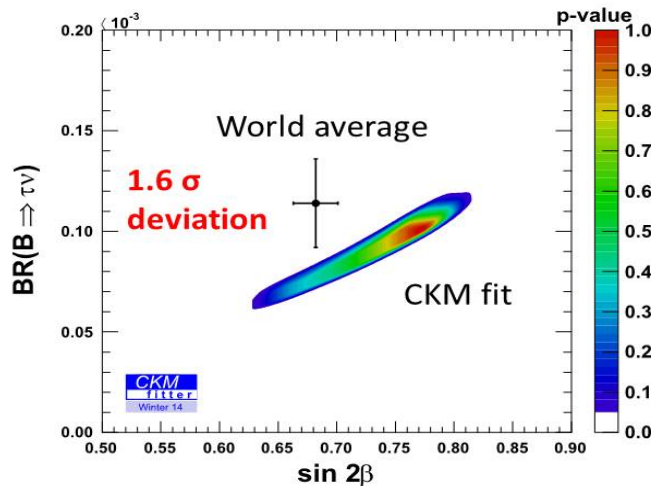


図 1.13: CKMfitter グループによる Belle・Babar による $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊分岐比の測定値と世界平均 [9]

2 Belle II 実験

この章では、Belle II 実験で使用される加速器と検出器について解説する。加速器は世界最高のルミノシティを目標とする SuperKEKB 加速器の開発が進められ、それに伴い高精度に粒子の崩壊事象をとらえる Belle II 検出器の開発も行われている。それぞれの概要について以下で簡単に説明する [14]。

2.1 SuperKEKB 加速器

加速器の性能を表す指標に「衝突エネルギー」と「ルミノシティ」がある。ルミノシティ (Luminosity: \mathcal{L}) とはビーム衝突点における粒子の単位面積、単位時間あたりの衝突頻度を示す量であり以下の式、

$$R = \mathcal{L}\sigma \quad (2.1)$$

で定義される。 R [s^{-1}] は対象となる事象の単位時間あたりの発生頻度、 σ [cm^2] は反応断面積である。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。

世界各地で行われる加速器実験は、高エネルギー加速器で衝突エネルギーをできるだけ高めヒッグス粒子や超対称性粒子などの重い粒子を直接生成する「エネルギーフロンティア実験」と、大強度加速器で標準模型からの差異を観測することで間接的に新物理事象の探索を行う「ルミノシティフロンティア実験」に大別される。前者で代表されるのは LHC 実験や ILC 実験であり、Belle II 実験は後者に含まれ標準理論を超えた新しい物理法則の解明のため、Belle 実験の 40 倍の統計量のデータ収集を行う。図 2.1 にこれまで使用されてきたものや、開発中などを含めた主要な加速器の重心系衝突エネルギー (横軸)、ルミノシティ (縦軸) を示す。

Belle 実験で使用された KEKB 加速器は電子を 8.0 GeV/c、陽子を 3.5 GeV/c に加速させ衝突させる非対称エネルギー衝突型加速器であった。Belle II 実験では最先端のルミノシティフロンティアを実現するため KEKB 加速器の 40 倍となる $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを目指し SuperKEKB 加速器へのアップグレードが行われる。図 2.2 に SuperKEKB 加速器の概要を示す。

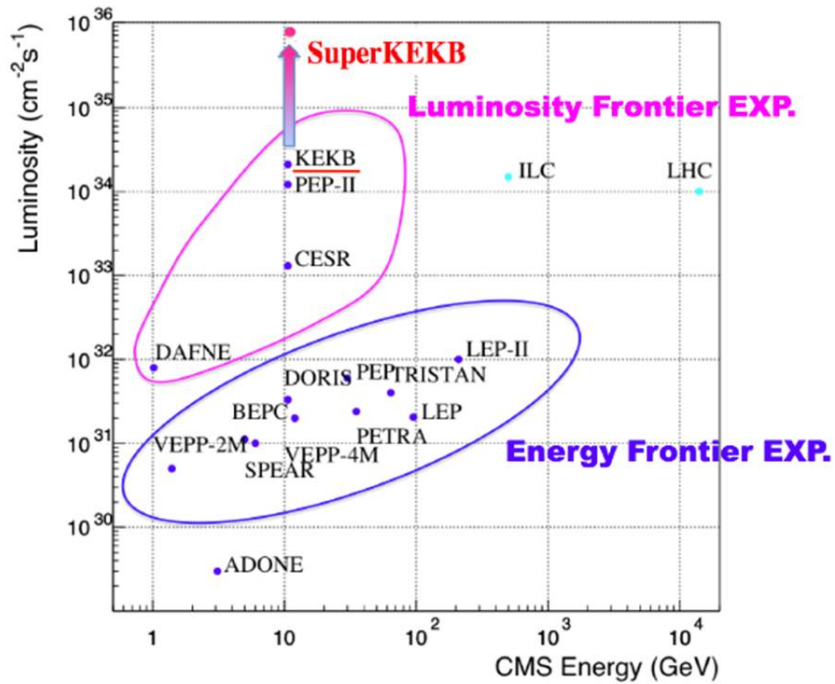


図 2.1: 世界各地の衝突型加速器フロンティア。青線で囲まれた領域がエネルギーフロンティア実験に属し、紫線で囲まれた領域がルミノシティフロンティア実験に属す。SuperKEKB 加速器は世界最高のルミノシティ到達を目指す。

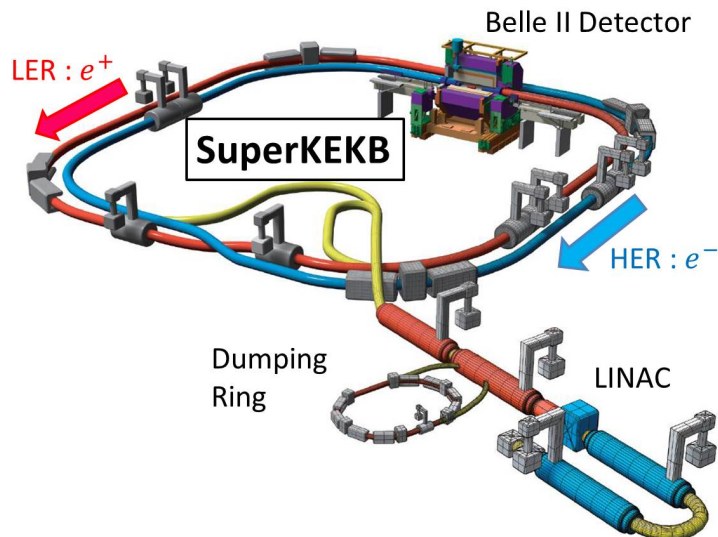


図 2.2: SuperKEKB の概要図。全周 3 km で電子蓄積リング (HER: High Energy Ring) と陽電子蓄積リング (LER: Low Energy Ring) が同一のトンネル内に設置される。電子・陽電子は線形型加速器 (LINAC) から入射される

表 2.1: KEKB と SuperKEKB の主なビームパラメータ比較

パラメータ	KEKB	SuperKEKB
Energy[GeV/c] (LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
ξ_y	0.129/0.090	0.09/0.08
$\beta_{y\pm}^*$ [mm]	5.9/5.9	0.27/0.30
I [A]	1.64/1.19	3.6/2.6
\mathcal{L} [$10^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	2.11	80

KEKB 加速器をアップグレードし、ルミノシティを向上するにあたり重要となるパラメータを明らかにするためにルミノシティ \mathcal{L} をビームに関するパラメータを用い以下のように書き直す。

$$\mathcal{L} \approx \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(\frac{\xi_{y\pm} I_{\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \right) \quad (2.2)$$

γ は Lorentz 因子、 e は素電荷、 r_e は古典電子半径、 I はビーム電流である。 ξ_y は beam-beam parameter と呼ばれる量で、衝突点でビームが互いに及ぼし合う力の大きさを表す。 $\beta_{y\pm}^*$ は y 方向衝突点 β 関数でビームサイズを決める絞込みの大きさに対応する量である。添え字にある \pm は電子 $-$ と陽電子 $+$ の積であることを示す。(2.2) よりルミノシティを向上させるにはビーム電流 I を上げるか、 $\beta_{y\pm}^*$ を小さくするといった選択肢が挙げられる。SuperKEKB 加速器では電流を KEKB 加速器の 2 倍に増強し「Nano-Beam 方式」を採用することで β を約 1/20 に抑えることでルミノシティを向上させている。

Nano-Beam 方式は衝突点におけるビームサイズを小さく絞り込むことで電子・陽電子衝突を高い頻度で起こさせる。しかしビームを絞ることでビーム内の(陽)電子同士のクーロン散乱が問題になる。これを Touchek 効果といい、ビームを絞ることで(陽)電子間の距離が小さくなることから引き起こされる。Touchek 効果は通常、SuperKEKB よりエネルギーが低い加速器で問題になるが SuperKEKB 加速器のビームサイズを従来に比べ非常に小さくするため個の影響は大きい。SuperKEKB では Touchek 効果が陽電子において顕著になるため、LER(陽電子ビーム) 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保つため HER(電子ビーム) エネルギーを 8.0 GeV/c から 7.0 GeV/c に変更される。

表 2.1 に KEKB から SuperKEKB への主なビームパラメータの変更点をまとめる。

式 2.1 のルミノシティ \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の推移予想図を 2.3 に示す。KEKB は 2010 年 6 月の運転終了直前に積分ルミノシティ $\int \mathcal{L} = 1 \text{ ab}^{-1}$ を達成したが、SuperKEKB は運転開始の 7 年後にはその 50 倍となる 50 ab^{-1} 達成を目指す。

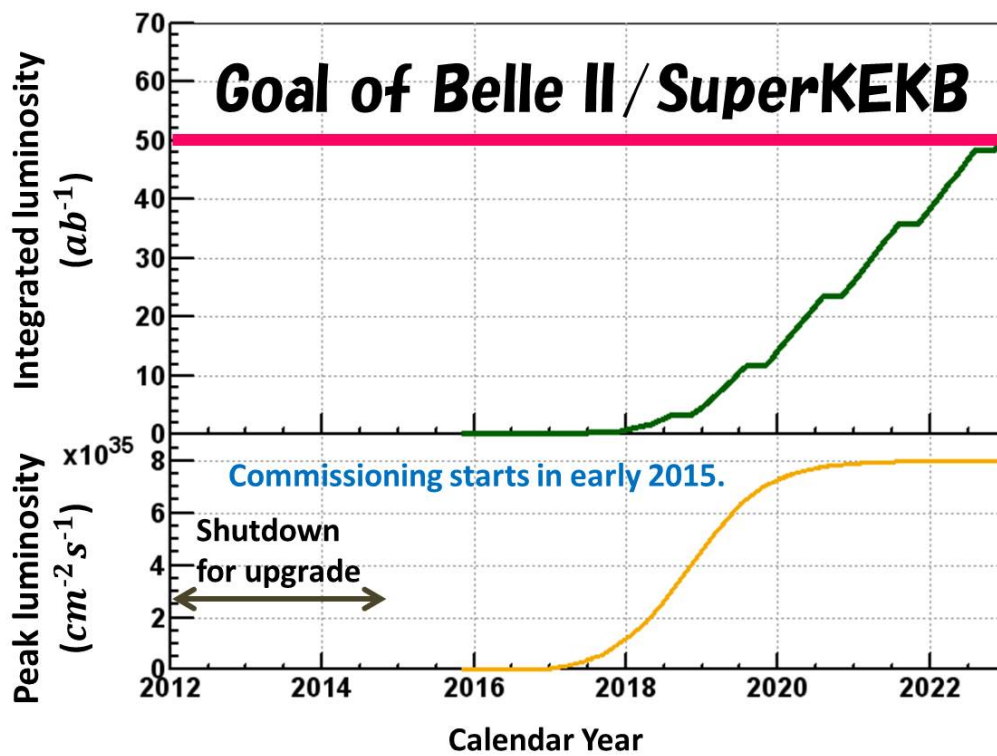


図 2.3: SuperKEKB 完成後の積分ルミノシティの推移予想図 (上)。到達ルミノシティの推移予想図 (下)。

2.2 Belle II 検出器

Belle II 検出器の概観を図 2.4 に示す。Belle II 検出器は目的によって異なった特色を持つ 7 つの検出器が集合した複合型検出器である。

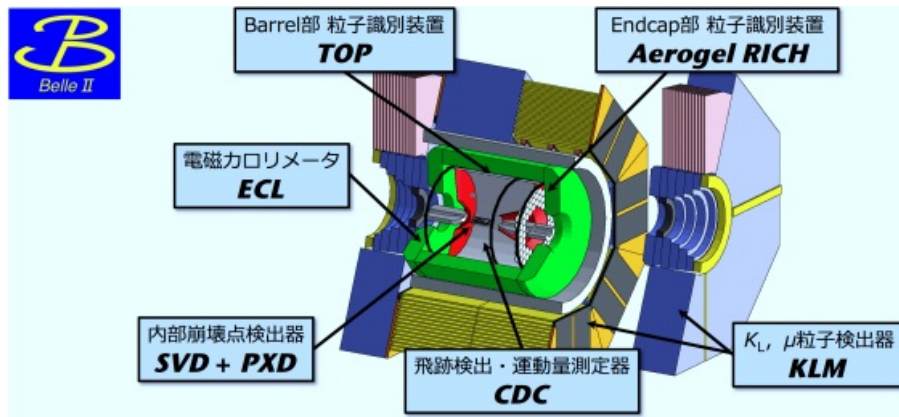


図 2.4: Belle II 検出器完成イメージ

その領域は大きく 2 つに分けることができる。電子・陽電子が通るビーム軸の同心円に沿った円筒状の領域を“Barrel 部”，その Barrel 部円筒の底面に対応する領域を“Endcap 部”と呼んでいる。更に Endcap 部は陽電子入射側を“Forward-Endcap”，電子入射側を“Backward-Endcap”と呼び区別している。首都大学東京では Forward-Endcap 部に設置される Aerogel RICH や DAQ の開発を主に担当している。以降 Forward-Endcap 部を簡単に Endcap 部と呼ぶこととする。以降、各検出器の役割と動作原理を簡潔に述べる。

2.2.1 PXD、SVD

Belle II 実験では B 中間子の崩壊点の位置検出器として、崩壊点側から 2 層のピクセル検出器から成る PXD (Pixel Detector) と 4 層のシリコンストリップ検出器から成る SVD (Silicon Vertex Detector) を採用している。一層一層はラダーと言われる構造の集合体である。その外観を図 2.5 に示す。

2 層の PXD は電子・陽電子衝突点から 14 mm、22 mm の距離にある。これは寿命としては $O(100 \text{ ps})$ 以下の粒子の崩壊点位置検出をすることに対応する。長寿命の粒子 (K_L 、 K^\pm 、 μ 、 π^\pm) 以外の粒子の崩壊点検出は PXD で行われる。その構造は DEPFET (DEpleted P-channel Field Effect Transistor) と呼ばれるピクセル化されたシリコン型検出器から構成されている。SVD は K_s などの比較的寿命の長い粒子の崩壊点検出で中心的な役割を果たすほか、低運動量の粒子の飛跡検出としても役割を持つ。SVD は DSSD (Double sided Silicon Strip Detector) というシリコン検出器を各層の両面にストリップ状に貼り付け、円筒状に 4 層重ねた構造である。両面のシリコン型検出器の向きが直行するようになっており、飛跡の位置分解能を有する (図 2.6)。

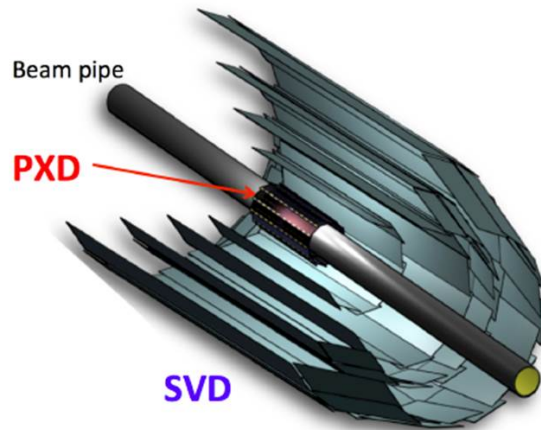
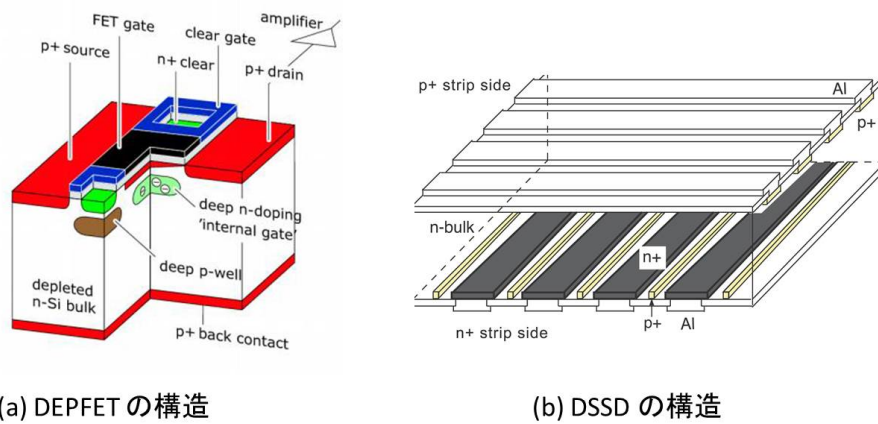


図 2.5: 完成イメージ、検出範囲はビーム軸から角度で $17^\circ \sim 150^\circ$



(a) DEPDET の構造

(b) DSSD の構造

図 2.6: (a) は PDX 用 DEPDET の構造。空乏層で励起された電荷をそのままトランジスタで増幅するような構造をしている。(b) は SVD 用 DSSD の構造。バルクシリコンの両サイドに p+ と n+ のストリップを持つ。空乏層内で生成した電子・ホール対は各ストリップに引き寄せられる。

2.2.2 CDC

CDC (Central Drift Chamber) は荷電粒子のトラッキング、トリガー生成、運動量測定、エネルギー損失測定を用いた粒子識別を役割を持つワイヤーチェンバーである。

CDC はビーム軸方向にかけられた 1.5 T の磁場によって湾曲する荷電粒子の飛跡情報から曲率半径 ρ [m] を求めることで、加速器実験では一般的な以下の式

$$p [\text{GeV}/c] = 0.3\rho B[\text{m} \cdot \text{T}] \quad (2.3)$$

から運動量 p を求めることができる。 B は磁場の大きさである。

ワイヤーチェンバー内部には陽極と陰極として多数のワイヤーが張られていて、その間に高電圧 ($\sim 2.3\text{kV}$) がかけられている。荷電粒子がチェンバー内を通過すると充填されたガス分子をイオン化して電子が作られる。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。検出された信号を取り出すことによって荷電粒子が通過した位置とそこに落としたエネルギー dE/dx を示ることができる。また、電子がドリフトしていた時間から正確な位置を測定することが可能である。

図 2.7 に電子 e^- 、陽子 p 、 K 、 π の持つ運動量と CDC で (単位距離当たり) 落とすエネルギー dE/dx の関係を示す。1 GeV/c 以下の運動量領域では CDC でも p 、 K 、 π の識別が可能ながわかる。しかし本実験ではこの運動領域以上の粒子識別も求められるため、後述する粒子識別装置を組み合わせる広いエネルギー領域における粒子識別を行う。

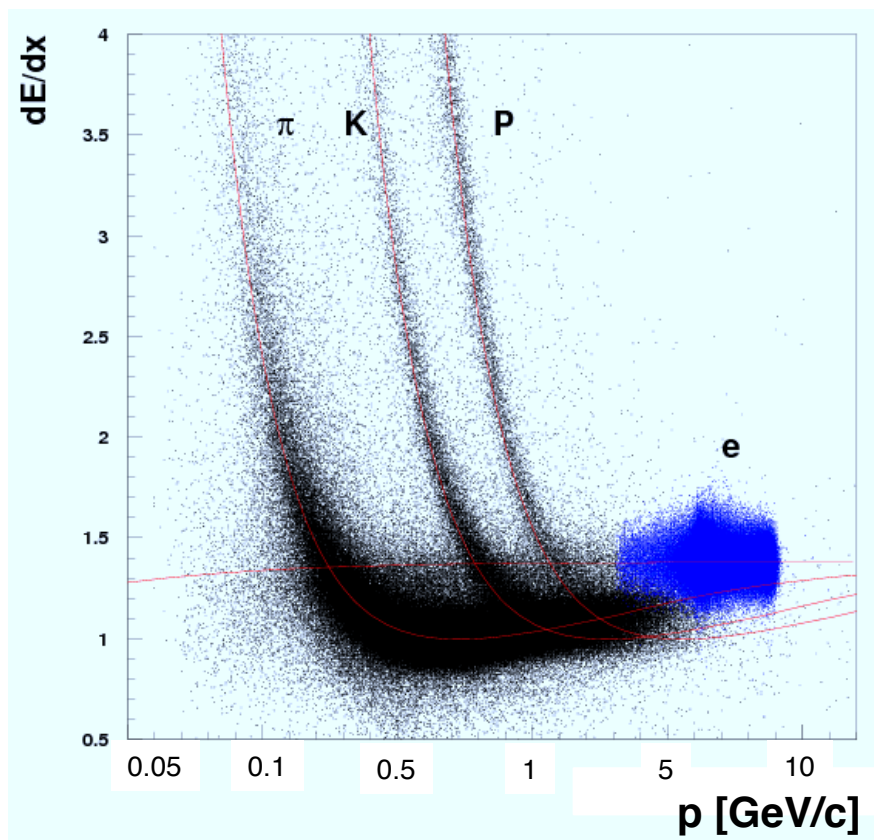


図 2.7: CDC による荷電粒子のエネルギー損失

図 2.8 に 2014 年 1 月に終了した実際の CDC のワイヤー張りの様子と CDC 断面図を示す。CDC では陰極ワイヤー数を約 14,300 張り、円心の中心部のセルサイズを小型化することで位置分解能を改善している。

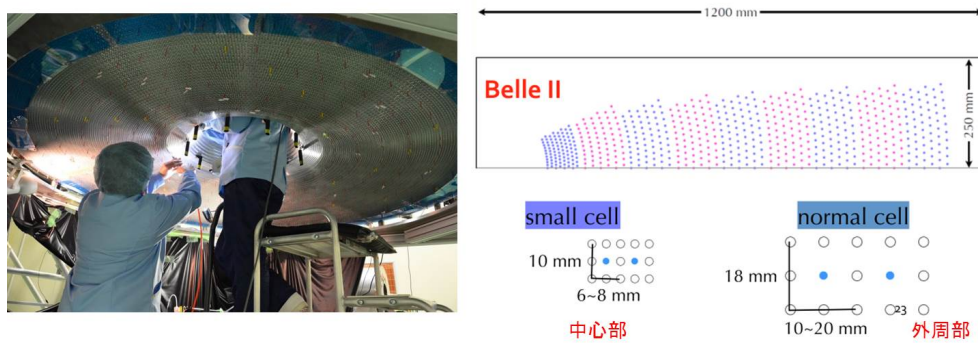


図 2.8: 実際のワイヤー張り作業の様子(左)。CDC の断面図(右上)。スモールセルとノーマルセルの大きさの比較(右下)。中心部は高いヒットレートが予想されるため、スモールセル(細かいピッチでワイヤーを張り)で位置分解能を向上させている。

2.2.3 TOP

Barrel 部での K^\pm と π^\pm の識別を行う装置として TOP(Time-of-Propagation) 検出器を開発している。TOP は DIRC(Detection of Internally Reflected Cherenkov light) と呼ばれる Cherenkov 光検出器の一種であり、荷電粒子が物質を通過した際に発生させる Cherenkov 光により粒子識別を行う。図 2.9 にその原理を示す。同図 (a) に TOP の基本原理である DIRC の原理を示し、また同図 (b) で TOP のモジュールの概念図を示す。

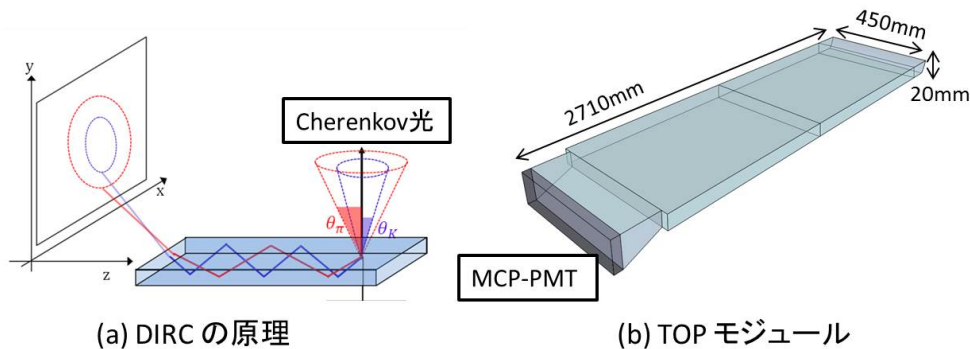


図 2.9: (a) は DIRC の検出原理。(b) は TOP モジュールの概念図。

光学輻射体には石英ガラスを採用する(図 2.10)。屈折率 n は ~ 1.47 である。クォーツバーを荷電粒子が通過しつ際に発生する Cherenkov 光がクォーツ内を全反射し、端部に到達した Cherenkov 光は半円形の形に投影することができる。荷電粒子の種類が違えば、Cherenkov 光の放射角 θ_C が異なるので、 π と K の場合は図 2.9(a) のようにリング半径の差から粒子を識別することができる。粒子識別には以下の式(式 2.4)を用いる。

$$\cos\theta_C = \frac{1}{n\beta} \quad (2.4)$$

放射角 θ_C を測定できれば粒子の速度 $\beta (= v/c)$ がわかり、相対論の式と Cherenkov 光発生条件式を組み合わせた式から粒子の質量がわかり、飛来粒子を同定することができる。さらに K/π のクォーツ内での光路差が異なるため検出時間にも差が生じる。光検出器に時間分解能を持たせることで検出器の識別性能を向上させることができる。TOP は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できる。そのため使用する光検出器には位置分解能と時間分解能、そして磁場中動作が可能などが要求される。これらの性能を満たす光検出器として MCP-PMT (Micro-Channel Plate PMT) を採用した (図 2.11)。4 × 4 の 16ch のアノードプレートの内蔵し、1ch のサイズは 5 mm × 5 mm である。最終増幅率は $O(10^6)$ 、時間分解能は 40 ps 程度である。MCP-PMT は図 2.9(b) のように Backward 側に設置される。その直前にはライトガイドが設置、像を拡大することで位置分解能を向上させる。クォーツバーは 18 枚筒状に構成し Barrel 部の粒子識別を行う。

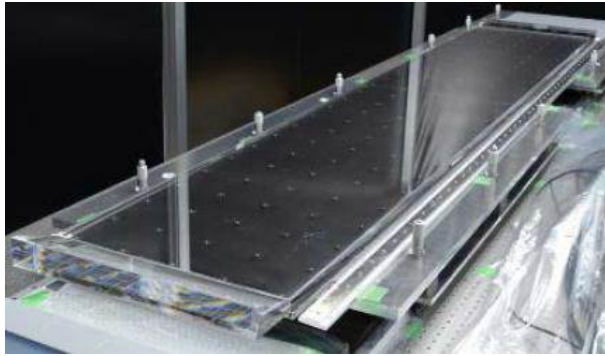


図 2.10: クォーツ



図 2.11: MCP-PMT

2.2.4 Aerogel RICH

Endcap 部での K^\pm と π^\pm の識別を担うのが Aerogel RICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov) 検出器である。A-RICH も Cherenkov 光検出器の一種で、荷電粒子が輻射体を通過した際に発生させる Cherenkov 光を光検出器で直接観測する。発生する Cherenkov 光は放射状に広がるため位置分解能を持たせた光検出器によって検出することでリングイメージとして観測することができる。このリングの半径は Cherenkov 放射角に依存するのでその半径から K^\pm と π^\pm の識別を行うことができる。輻射体にはシリカエアロゲル (屈折率 ~ 1.05) を使用し、光検出器として 144ch のマルチアノード型 Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) を採用した。また、HAPD 専用の読み出し回路の開発も行い、どれも現在は量産の段階である。Aerogel RICH の詳しい動作原理、構成に関しては第 3 章に、量産版 HAPD の性能評価報告は第 4 章、量産版読み出し回路の性能評価報告は第 5 章で詳しく述べる。図 2.12 は Aerogel RICH の設計図である。中心をビームパイプが通るため同心円状の構成となっている。

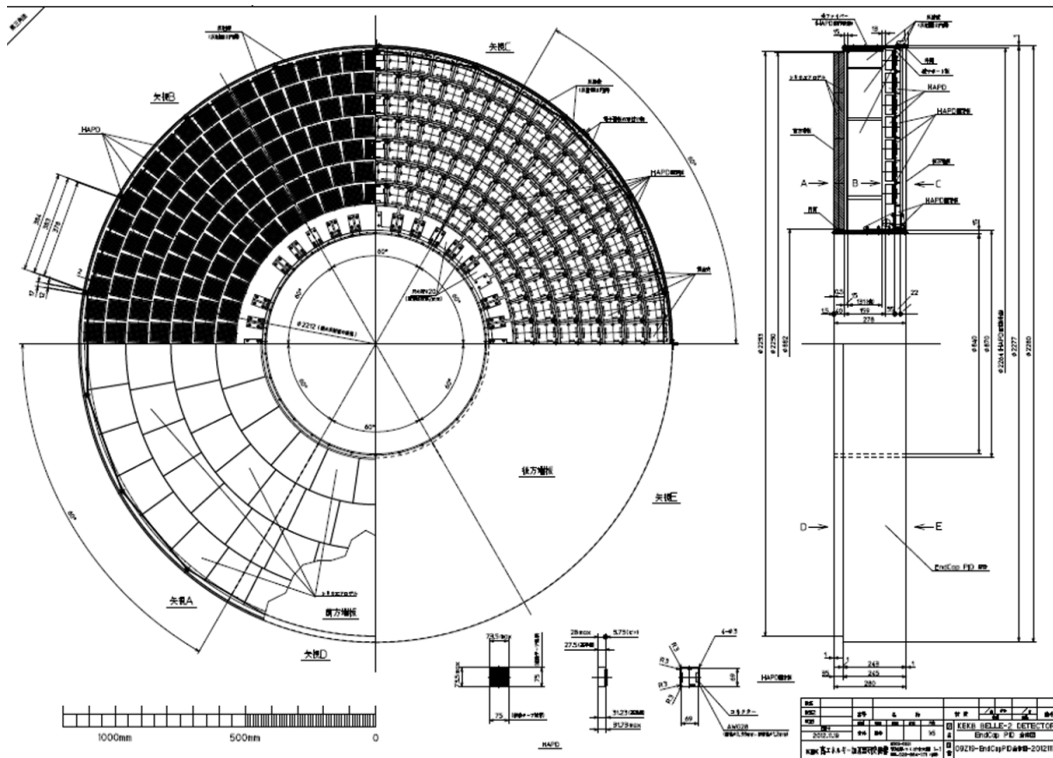


図 2.12: Aerogel RICH の設計図。上半分は HAPD、右半分 (左) はエアロゲルの設置位置を表している。

2.2.5 ECL

Barrel 部と Endcap 部での光子と電子のエネルギーを測定するのが ECL (Electromagnetic Calorimeter) である。測定原理は、検出器内の結晶シンチレータに入射した光子や電子が電磁シャワーを形成し、ほぼ全エネルギーを結晶シンチレータ中で失う。このエネルギー損失によるシンチレーション光量を光検出器で測定することで、粒子の持っていた全エネルギーを見積もることができる。また、電子・陽電子散乱である Bhabha 散乱を検出し、その頻度を見積もることで電子・陽電子の衝突頻度を算出できることから、ルミノシティを測定する役割も担う。

シンチレータには豊富な発光量が得られるタリウムをドープした CsI を採用し、PIN フォトダイオード読み出しと組み合わせて高いエネルギー分解能を実現した (図 2.13)。しかし、タリウムをドープした CsI は発光時定数が長い ($\tau \sim 1\mu\text{s}$) ため、Belle II 実験の高ルミノシティ環境下ではビーム由来のバックグラウンドに大きく影響を受けてしまう。そこで、2MHz 波形サンプリングを行いフィッティングにより信号の重なりを排除する方法がとられる。これによりバックグラウンド由来のダークフォトンの影響を 1/7 以下に抑えることができる。また、バックグラウンドの影響が大きい Endcap 部において 発光時定数の短い pure CsI ($\tau \sim 30\text{ns}$) に置き換えた。

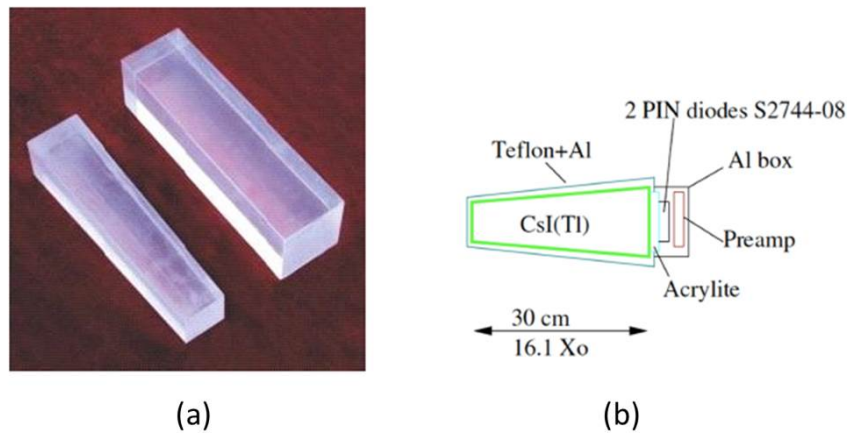


図 2.13: ECL の構成。(a) ECL 用クリスタル (CsI(Tl))、(b)ECL の 1 ユニットの構成

2.2.6 KLM

KLM (K_L^0 and muon) 検出器は、Belle II 検出器の最外層に設置され、比較的寿命が長い K_L^0 と μ の識別を行う検出器である (図 2.14)。KLM は RPC (Resistive Plate Chambers) という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^0 と μ の相互作用の違いで粒子識別を行う。 K_L^0 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、それに対し μ は KLM を通過できるため CDC 等の飛跡情報と組み合わせることで識別が可能となる。RPC は高電圧を印加して帯電させた絶縁性ガラスでガスチェンバーを挟んだ構造をしており、荷電粒子が通過した近傍 ($\sim \text{cm}^2$) でストリーム放電が起きるため、その信号電圧を測定することで位置情報を読み出す。ただし、RPC では一度放電を起こすと再充電までの dead time が 2 秒ほどかかってしまう。Belle II 実験では高レート化による影響で Endcap 部のバックグラウンドが特に上昇するため、長い dead time を短くする必要がある。そこで Endcap 部には RPC の代わりにプラスチックシンチレータを導入することでこの問題を解決する。Endcap 部の 1/4 モックアップあたり 75 本のシンチレータが導入され、荷電粒子通過の際に放射されるシンチレーション光をシンチレータ中心に設置されたファイバーによってとらえる (図 2.15(b))。これを MPPC (Multi Pixel Photon Counter) というマルチピクセル型の光検出器で検出する。この改良により Endcap 部のバックグラウンドが 2 桁ほど低減できる見込みである。

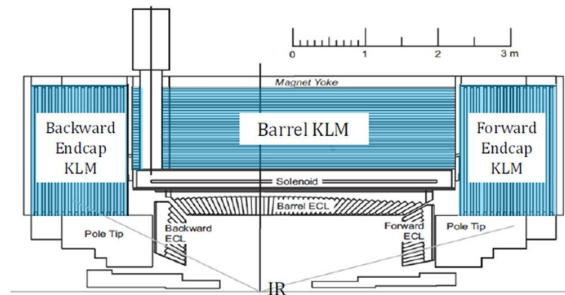


図 2.14: KLM の設置図

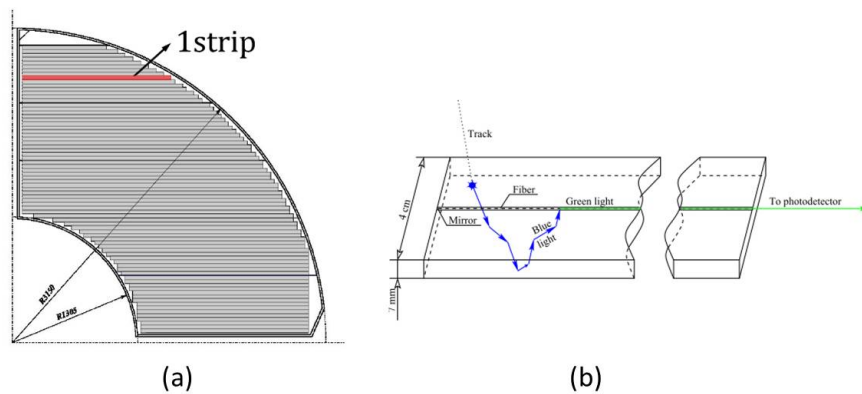


図 2.15: (a) Endcap 部の 1/4 モックアップ、(b) 1 ストリップの構造

2.2.7 データ収集システム

図 2.16 および表 2.2 に Belle II 実験データ収集 (Data Acquisition, DAQ)[10] システムの概観およびシステムの要求性能を示す。Belle II DAQ システムではレベル 1 トリガーレートが最大 30kHz に、読み出されるデータ量は 30GB/秒にも達する膨大なデータをリアルタイムに処理し、データの削減を行うことで物理解析上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する。システム開発には Belle2Link[11] と呼ばれる光ファイバに接続した検出器読み出し回路からの信号を合計約 200 台の COPPER (COmmon Platform of Pipe-line Electronics Readout)[12] ボードで信号読み出しを行う共通フレームワークを採用し、開発・メンテナンスの効率化を図った。PXD 検出器を除く 6 検出器は Belle2Link からデータ読み出し、第一段階のイベントビルダーで結合した後に High Level Trigger (HLT)[13] システムで事象選別を行う。一方で PXD 検出器は読み出されるデータサイズは膨大であり、別途開発した ONSEN (ONline Selector Node) モジュールを用いて読み出す。HLT からの出力と PXD からのデータを第二段階のイベントビルダーが結合し、ディスクストレージに保存する。PXD から送られる膨大なデータはすべてを保存することはできないため、HLT で他の検出器の出力から発生粒子が通過したであろう PXD 検出器上の領域を選び出すことでデータサイズの削減を行う。HLT ファーム及びオンラインスト

レーズは最大 10 ユニットが並列に稼働し負荷を分散することで高レートでのデータ取得に対応する。

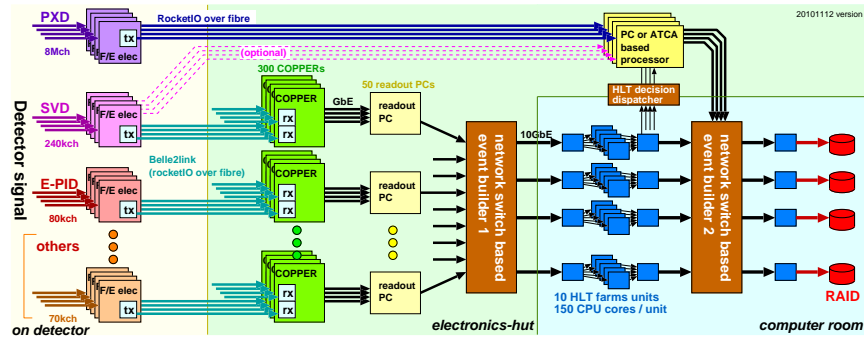


図 2.16: Belle II データ収集システムの概観図。

表 2.2: Belle II データ収集システムの要求性能

最大トリガーレート	30kHz
最大イベントサイズ	1MB
レベル1 データフロー	30GB/sec
PXD データサイズ削減	1/10
HLT レート削減	1/3 から 1/6
記録データレート	1.8GB/sec

3 Aerogel RICH の開発

この章では、首都大学東京、KEK、千葉大学、新潟大学、東京理科大学、東邦大学からなる A-RICH 検出器開発グループが開発を行っている新型の粒子識別装置 Aerogel RICH (A-RICH) について解説する。A-RICH 検出器は Belle II 検出器 Endcap 部に設置され荷電 K/π 識別を主な目的としている。Endcap 部は空間的に大きく制限されるため、A-RICH 検出器にはコンパクトな形状が求められる。

本章では A-RICH 開発背景や動作原理について解説し、Belle II 実験で使用するうえでの要求性能をまとめる。そしてそれらの要求を満たすよう開発された A-RICH の主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し、それらを用いたプロトタイプ A-RICH の性能評価として、2013 年 5 月にドイツ電子シンクロトロン (DESY) 研究所にて行われた電子ビームテストの結果を述べる。

3.1 開発背景

Belle II 実験で観測される B 中間子の崩壊モードでは荷電 K 中間子、荷電 π 中間子はその終状態に含まれるため、これらの正確な識別が重要となる。Belle II 実験では CDC、TOP、A-RICH により粒子識別を行い、特に A-RICH は Endcap 部を担当する。従来の Belle 実験では、Endcap 部での粒子識別を CDC + ACC (Aerogel Cherenkov Counter) が担っていた。同様の役割として Belle II 実験では Endcap 部での粒子識別を CDC + A-RICH で行う。Belle 実験では ACC と CDC を組み合わせることで飛来した荷電 K 中間子を荷電 K 中間子と識別できる確率 (efficiency) が 85% の時に、荷電 K 中間子を荷電 π と間違える確率 (fake rate) が 10% であったが、Belle II 実験では A-RICH のみで efficiency が 95% の時に fake rate が 1% に抑えられるよう設計となっている [14]。

また、Belle 実験 Endcap 部に設置された ACC は運動量領域が $0.5 \sim 2.0 \text{ GeV}/c$ までとなっており低運動量粒子識別に設定された。しかしながら 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、Forward-Endcap 部にも生成粒子が飛来しやすく 2 体崩壊による高運動量を持った粒子も Endcap 部にやってくる。そこで A-RICH の識別可能運動量領域を

$$0.5 \text{ GeV}/c < p < 3.5 \text{ GeV}/c \quad (3.1)$$

とし、従来の ACC を超える高運動量領域での粒子識別を行うことのできる検出器として新型の粒子識別装置として A-RICH を採用することとなった。A-RICH では 4σ 以上の荷電 K/π 識別を行えるよう開発が進められている。

3.2 A-RICH の粒子識別原理

A-RICH は輻射体を荷電粒子が通過することで発生する Cherenkov 光が作り出すリングイメージからの情報によって識別を行う。これをリングイメージ型 Cherenkov 光検出器 (Ring Imaging Cherenkov counter : RICH) という。リングイメージから粒子を識別

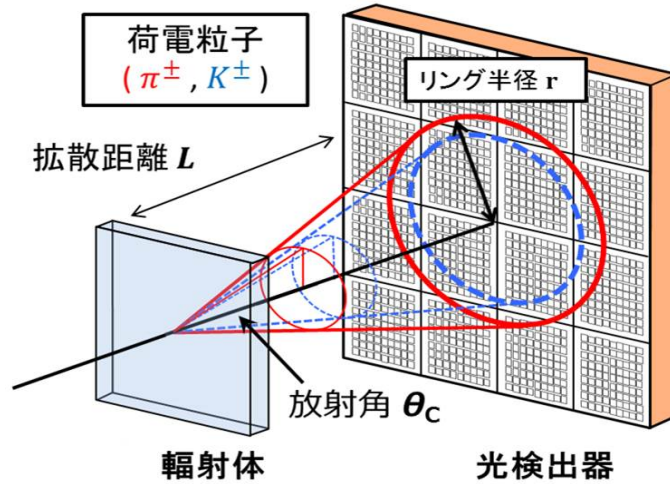


図 3.1: RICH の基本構成とリングイメージ検出方法の概念図

する原理を以下に示す。Cherenkov 光放射角 θ_c と荷電粒子の質量 m の間で成り立つ以下の式を利用する。

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1} \quad (3.2)$$

ここで 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。粒子の軌跡や運動量は CDC から得ることのできる情報であり、 n は輻射体の屈折率を計測することで既知である。あとは θ_c の値を知ることができれば粒子の質量 m を決定することができる。RICH では積極的に Cherenkov 光を発生させ、正確に放射角を求めることが重要となる。図 3.1 のように輻射体を荷電粒子が通過した際、物質内で Cherenkov 光が発生する。それが円錐状に放射され、後段の光検出器でそれを 2 次元的に検出する。そこから得られたリングイメージを解析することでリング半径を求め、最終的に粒子識別を行う。

発光点から検出点までの拡散距離 L を用いて、放射角 θ_c とリング半径 r の関係を $\theta_c = \tan^{-1}(r/L)$ の式で書くことができる。

次に、A-RICH の特徴・構成について解説する。一般的な RICH の構成は Cherenkov 光の焦点方法により 2 種類に大別される。1 つはミラー焦点型 (図 3.2(a)) といい、発生した Cherenkov 光を鏡で反射させその焦点に検出器を設置する構造である。一般的に RICH では輻射体を厚くすることで発生光子数を増大させることができるが、得られるリングイメージの焦点がぼやけるために角度分解能の悪化につながる。ミラー焦点型は、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、角度分解能を落とさずに検出光子数を増やすことが可能である。他にも L を大きくとれることや、光を集光することにより光検出器の面積を小さくできるなど様々な長所がある。しかし、構造が大きくなってしまい、十分な設置スペースが必要となる。

もう 1 つが近接焦点型 (図 3.2(b)) である。これは輻射体の正面に検出器を配置し、正面でリングイメージを観測する構成になっている。ミラー焦点型のように鏡を設置する必要がなく設置規模は抑えることができる。しかし、角度分解能を悪化させずにリングイメー

ジをとらえようとする、輻射体を薄くしなければならず検出光子数は低下することになる。

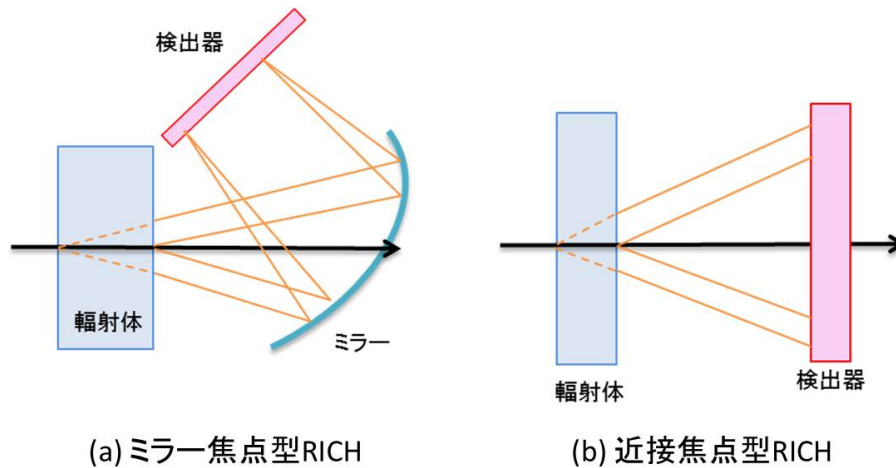


図 3.2: RICH の構成による分類

Endcap 部粒子識別装置に要求される設置スペースは奥行約 30 mm と限られているため近接焦点型 RICH を採用した。しかし、検出器の性能向上のためには近接焦点型は検出光子数の増大が課題となる。1トラック (1回の荷電粒子の通過) 当たりの角度分解能 σ は以下の式に従う。

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

σ_{single} は 1 光子当たりの角度分解能、 $N_{p.e.}$ は平均の検出光子数、 d は輻射体の厚さである。輻射体を厚くすれば $N_{p.e.}$ は増えるが、式 3.3 より 1 光子当たりの角度分解能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で内部の光子放射点の不定性が大きくなることに由来する。先行研究で輻射体の厚さは 20 mm が最適値であることが分かっている [15]。そこで、輻射体の厚さにも制限がある中で、検出光子数を保ちつつ、1 光子当たりの角度分解能をよくするため屈折率の異なる輻射体を複数組み合わせるというマルチレイヤー方式を取り入れた。その概念図を図 3.3 に示す。図 3.3(a) が同一の屈折率を持った輻射体が 1 枚のとき、同図 (b) がそれぞれ異なる屈折率 n_1 (上流側)、 n_2 (下流側) を持った輻射体を用いたときの様子である。特に、屈折率を $n_1 < n_2$ に設定することで、全段の輻射体で発生した Cherenkov 光と後段で発生した Cherenkov 光でリングイメージの幅を絞ることができ角度分解能を小さくすることができる。この方法により、角度分解能を悪化させることなく、検出光子数を最大限に保つことができる。A-RICH ではこのマルチレイヤー方式を用い、高い K/π 識別能力を実現する。

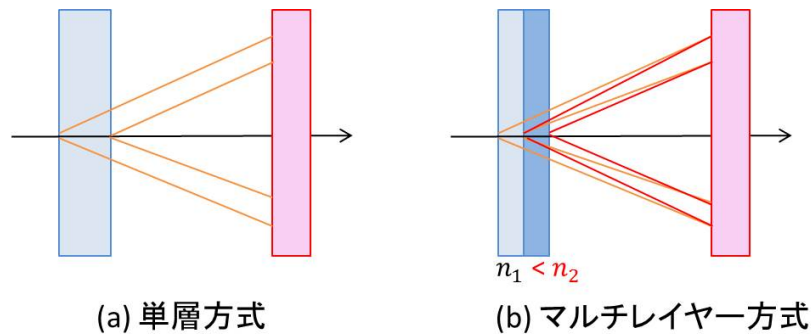


図 3.3: (a) 輻射体 1 枚の単層。 (b) 輻射体 2 枚の複層 での Cherenkov 放射を表した図。
 (b) では屈折率を $n_1 < n_2$ に設定することでリングイメージを絞っている。

3.3 A-RICH の性能要求

以下に、A-RICH の構成要素とそれに要求される性能などについてまとめる。

- 輻射体

- 0.5 ~ 4.0 GeV/c の広い運動量領域でも粒子が Cherenkov 光を発生できるような高屈折率 (> 1.05) であるとともに検出光子数を増やすため透過長が可能な限り大きい物質

- 光検出器

- 設置する輻射体の屈折率に応じて、荷電粒子 (K/π) が作り出すリングイメージのリング半径差に適した位置分解能
- 光検出器に到達する Cherenkov 光はピクセルあたり 1 光子相当の弱い光である。そのため、1 光子検出が可能であること
- Belle II 検出器にかかる 1.5 T 以上の磁場中で問題なく動作すること

- 放射線耐性

- 予定されている Belle II 実験 10 年間の運用で 予想される A-RICH の放射線量は、中性子が 1 MeV 換算量で 1.0×10^{12} neutrons/cm²、ガンマ線が 1000 Gy とされている。放射線の影響で予想されるのが光検出器のノイズ量の増大などであるため十分な対策が必要である

- 読み出しシステム

- 多チャンネル (約 6 万チャンネル) の同時読み出し
- 奥行 5 cm という空間的制限に設置可能なコンパクトな設計であること

各構成要素ごとにこのような性能が要求される。この要求を満たすものとして、輻射体をシリカエアロゲルに、光検出器として **Hybrid Avalanche Photo-detector (HAPD)** を採用した。また読み出しシステムについてもこれらの構成要素に適したものを独自に開発した。以下で、「シリカエアロゲル」、「HAPD」、「読み出しシステム」の性能と現在までの開発状況についてまとめる。

3.3.1 シリカエアロゲル

シリカエアロゲルは SiO_2 が 3 次元的に配列した多孔物質 (図 3.5(a)) で、体積の約 98 % を空気が占めた物質である。粒子径が数 10 nm 程度と、可視光の波長 (400~700nm) に比べ小さいため優れた光透過性を持っている。また、固体でありながら低屈折率、低密度、高透過長を実現する特殊な構造をしている。エアロゲルは密度を自由に調整できることから、任意に屈折率を選ぶことができることも大きな特徴の 1 つである。表 3.1 に輻射体として使用される主な物質とその物性値を記す。また、図 3.5(b) に実際のシリカエアロゲルの示す。表面が青みがかっているのはシリカエアロゲルの光学的特徴として表面で Rayleigh 散乱が起きているからである。

荷電 K/π の運動量と輻射体の屈折率の関係を図 (3.6) に示す。同図より 0.5 GeV/c 以上の運動量を持った荷電 π 中間子で Cherenkov 光を発生させるために、輻射体の屈折率を > 1.05 にする必要がある。シリカエアロゲルの屈折率を 1.05 付近に調節することで 0.5 ~ 1.5 GeV/c の領域では Cherenkov 光の発生の有無、1.5 GeV/c 以上では Cherenkov 角の測定により K/π 識別が可能となる。

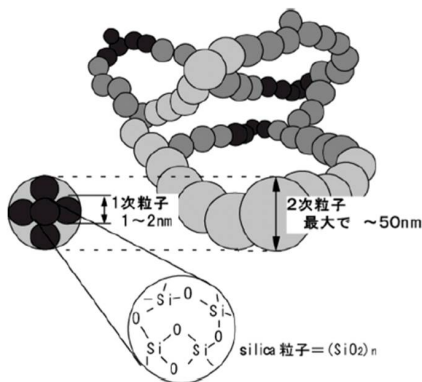


図 3.4: シリカエアロゲルの内部構造



図 3.5: シリカエアロゲルの外観

表 3.1: 代表的な輻射体とその物性値

物質	屈折率	密度	その他
シリカエアロゲル	1.007~1.2	0.0281~	
空気	1.00028	0.001293	25 °C、1atm
水	1.3428	0.99984	20 °C
ガラス	1.48~2.00	2.4~2.6	光学ガラスなど

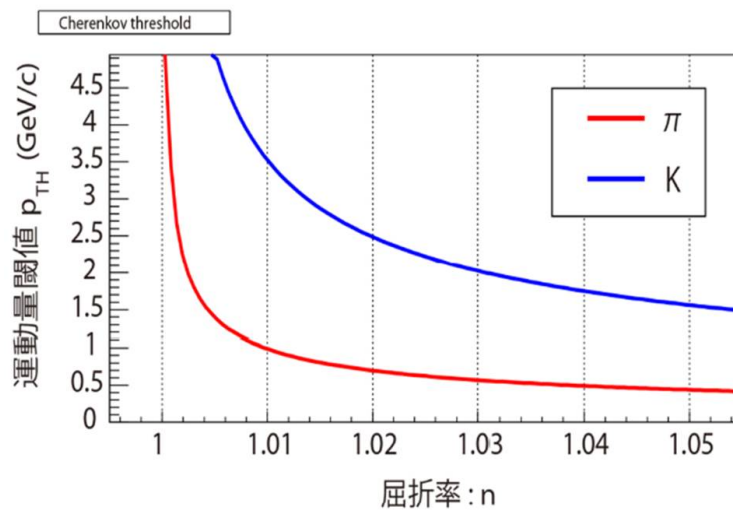


図 3.6: 荷電 K/π の運動量と輻射体の屈折率の関係。赤線が荷電 π 粒子の Cherenkov 光の発生閾値で、青線が荷電 K 粒子のものである。

輻射体の開発状況

エアロゲルの開発は千葉大学のグループが主に行っている。従来の製造法では大きな屈折率を得ようとするとう透過率が低くなり、高屈折率のエアロゲルの製造は困難であったが、近年の製造方法改善により高屈折率化、密度の一様性の向上、タイルの大型化が実現した。製造法が確立された現在では、屈折率は 1.003 ~ 1.25 の範囲で製作が可能となった。また、シリカエアロゲルタイルの大面积化にも成功した。図 (3.7) は実際に A-RICH に搭載されるサイズ (18 × 18 × 2) cm³ のシリカエアロゲルタイルである [16]。実機では 124 箇所のシリカエアロゲル設置スペースがあるため全 248 枚 (予備を含めると 350 枚以上) のタイルの製作を行う必要がある。現在はタイルの量産・性能評価がすでに完了しており、要求される性能を持ったシリカエアロゲルが十分数確保されている。以下に A-RICH で使用するシリカエアロゲルの各種パラメータを示す。

- 屈折率 (Cherenkov 光相当の波長 $\lambda = 400$ nm のとき)
 - 下流側 シリカエアロゲル屈折率 $n_1 = 1.055$

- 上流側 シリカエアロゲル屈折率 $n_2 = 1.045$
- $0.008 < n_2 - n_1 < 0.012$
- 透明度
 - n_1 : $\lambda = 400 \text{ nm}$ での透過長が 40-45 mm
 - n_2 : $\lambda = 400 \text{ nm}$ での透過長が 30-35 mm
 - 大きなひび割れがないこと。

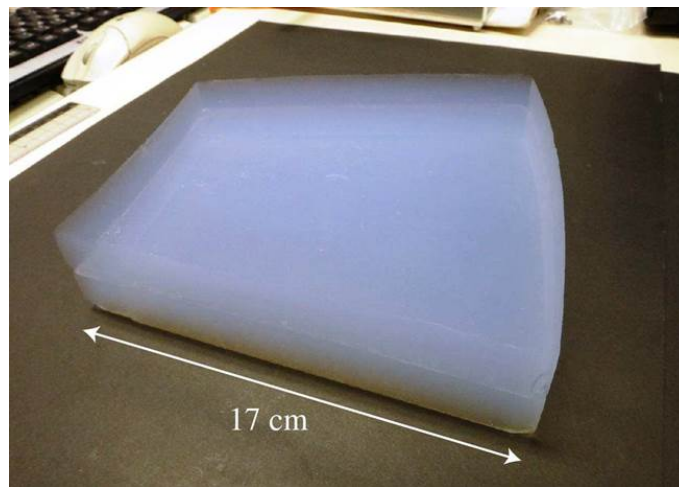


図 3.7: シリカエアロゲル:実機使用のサイズ ($18 \times 18 \times 2 \text{ cm}^2$)

3.3.2 HAPD

A-RICH では光検出器として 144 ch マルチアノード型 HAPD を採用した。開発は首都大学東京と KEK が担当し、浜松ホトニクス (株) と共同で開発を行っている。エアロゲルの屈折率を 1.05、荷電粒子運動量を $4 \text{ GeV}/c$ とした場合、荷電 K/π の放射角度差は (3.2) 式より 23 mrad 程度と計算できる。この角度差からリング半径の差も計算でき、その長さは約 5 mm となる。そこで HAPD は位置分解能を 5 mm 程度に持ち、また 1 光子検出可能といった性能要求を満たすよう設計されている。図 3.8 にその外観と寸法を示す。

HAPD は高電圧が印加できる真空管内部に、ピクセル化された APD (Avalanche photo diode: Avalanche (雪崩) 増幅を利用した受光ダイオードの一種) が内蔵されている構造となっている。

動作原理

HAPD の構造を図 3.9 に示す。入射窓の内側にアルカリ金属を蒸着させ光電面とし、光電陰極としている。HAPD の内部は真空になっており、APD (Avalanche photo diode :

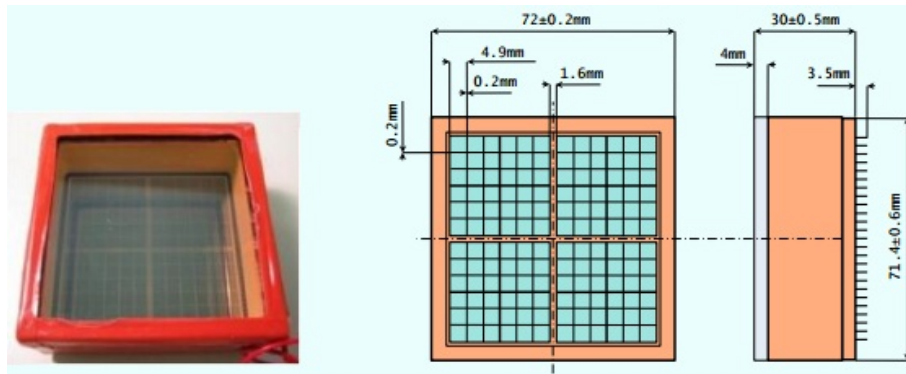


図 3.8: 左図は実際の 144ch マルチアノード型 HAPD。右図はその寸法。

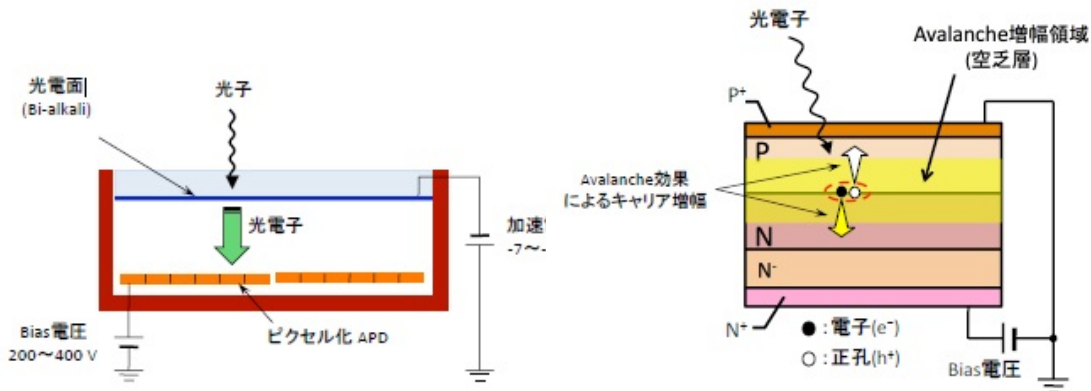


図 3.9: HAPD の構造

図 3.10: APD の動作原理

Avalanche 増幅を利用した受光ダイオードの一種) がピクセル化された状態で配列している。APD 1つの増幅原理を表したのが図 3.10 である。逆バイアス印加によって空乏層が形成された状態の APD に加速された光電子が入射され電子-正孔対を生成する。それぞれが逆バイアスに引き寄せられドリフト運動し電極に向かう。電極付近の高い電場勾配領域では、空乏層内の格子原子や不純物と衝突し 2 次キャリアを形成し、これもまた別の格子原子や不純物と衝突して 2 次キャリアを励起させるという Avalanche 増幅を起こす。最終的に入射電子数に比例した電圧パルスとして検出させる。

しかし APD の増幅率は比較的 low、一般的な光電子増倍管 (PMT) の増幅率が $O(10^6) \sim O(10^8)$ であるのに対し、APD の増幅率は $O(10)$ 程度である。これを補うために光電子を APD に入射させる際、高電圧により電場加速させることで入射エネルギーを上げ、空乏層での電子-正孔対生成を多く生じさせている。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、最終的な HAPD の増幅率としては $O(10^4)$ を得ることが可能である。増幅過程の初段である電場加速による電子打ち込み増幅が大きいことから、HAPD は 1 光子検出に優れているといえる。また APD はその動作原理から磁場の影響は PMT に比べ小さく、Belle II 実験環境下でも動作可能である。したがって HAPD は A-RICH の求める性能を満たしていると考えられている。

放射線耐性

Belle II 実験では電子・陽電子ビームの衝突点で radiative Bhabha 散乱 (図 3.11) が起き、ガンマ線が放出される。放出されたガンマ線は検出器外部にあるビームパイプや磁石に衝突することで中性子を放出する。これが Endcap 部まで飛来すると検出器にとってバックグラウンドとなる。また検出器付近では Touschek 効果²が発生し、軌道を外れた粒子がビームパイプなどに衝突することで発生するシャワーの影響を受ける。シャワーの散乱率は電流と粒子密度に比例するため、SuperKEKB ではその影響が大きいと考えられるが、重金属 (タングステン等) でシールドする予定である。

シミュレーションにより Belle II 実験で 10 年間に飛来する換算線量は 1 MeV 相当の中性子で最大 1.0×10^{12} neutrons/cm²、ガンマ線量が 1000 Gy 程度と見積もられている。特に A-RICH 検出器に対しては中性子による影響が大きいと見込まれるため、以下では中性子による影響と対策について述べる。

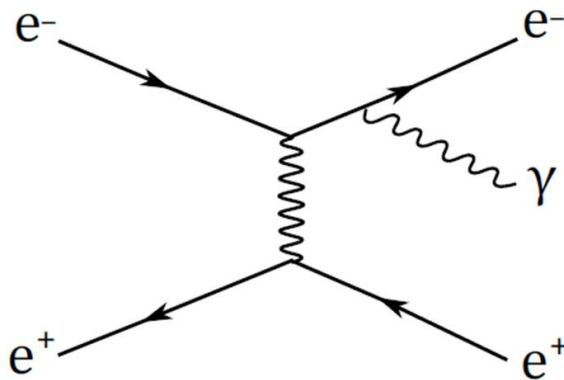


図 3.11: 最低次の Radiative Bhabha 散乱のダイアグラム

中性子線は電荷を持たないため、光検出器内の半導体に与えるダメージは非電離的エネルギー損失によるものである。中性子線が入射する際にそのエネルギーが十分に大きいと半導体結晶を構成する原子が弾性衝突により弾き飛ばされ格子欠陥が生じる。弾き出された原子はその周辺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 3.12(a))。多くの格子欠陥と格子間原子は再結合を起して消滅するが、一部は安定な欠陥となり半導体のバンドギャップに新たなエネルギー準位 (欠陥準位) を形成する (図 3.12(b))。通常は高いバンドギャップのため伝導体へ励起できなかった束縛電子が、この欠陥準位を介することで熱励起しやすくなってしまふ。この結果、熱励起される電子が増加し、漏れ電流となる。この漏れ電流の増加がノイズの原因となり検出器の性能を低下させる。

²バンチ内の同一粒子が相互作用し散乱する。

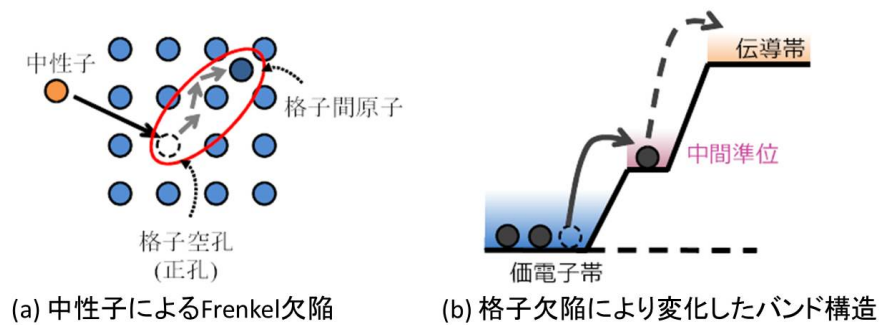


図 3.12: 中性子線による半導体内結晶損傷の仕組み

以上の問題を踏まえ、以下に示す解決策を講じた。

- 読み出し回路の最適化
- HAPD 用 APD 構造の最適化

読み出し回路の最適化に関しては第 4 章で詳しく紹介する。先行研究 [17] により半導体へのダメージは P 層の厚さに寄与することがわかったため、P 層を薄くすることで漏れ電流の影響を低減し、高い中性子線耐性を実現した。

HAPD の概要

HAPD の構造を図 3.13 に示す。図 3.13 の背面図に示しように HAPD の背面から信号出力用のピンが配線されている。図 3.14 に HAPD のチャンネルは位置とピンは位置の図を示す。HAPD は位置検出を可能とするために 6×6 の 36 分割された APD を 4 チップ配置し、合計で 144 チャンネルの読み出しを行うことができる。真空管内部の各ピクセルは $4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$ のサイズになっており、外形を成す真空管部は $73 \times 73 \text{ mm}^2$ のセラミック容器を用いており、入射窓は合成石英を使用している。入射窓にはスーパーバイアルカリが蒸着されている。表 3.2 に HAPD の各種パラメータを示す。

図 3.15 に HAPD の波高分布を示す。次に JAPD の量子効率について述べる。図 3.16 に HAPD の量子効率の波長依存性について示す。HAPD は光電面にスーパーバイアルカリを用いており、スーパーバイアルカリの典型的なピーク値は 30 % 程度である。HAPD は典型的なチェレンコフ光の波長である 390 nm (紫外線) 程度の領域に対し 28 % 以上の量子効率を持っている。

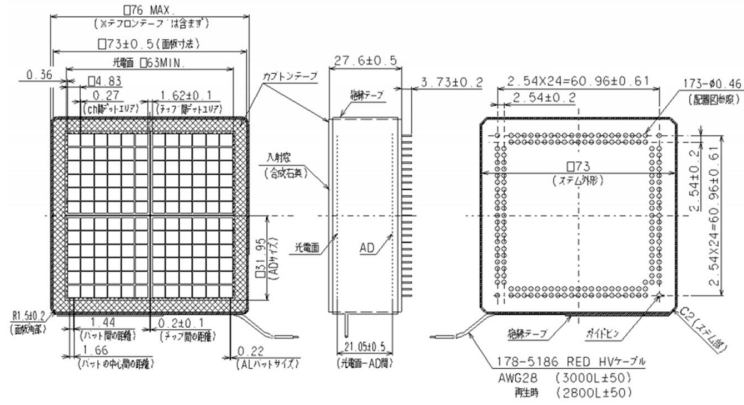


図 3.13: HAPD 構造図。左から表面、側管、背面の図。背面から信号出力用のピンが配線されている。

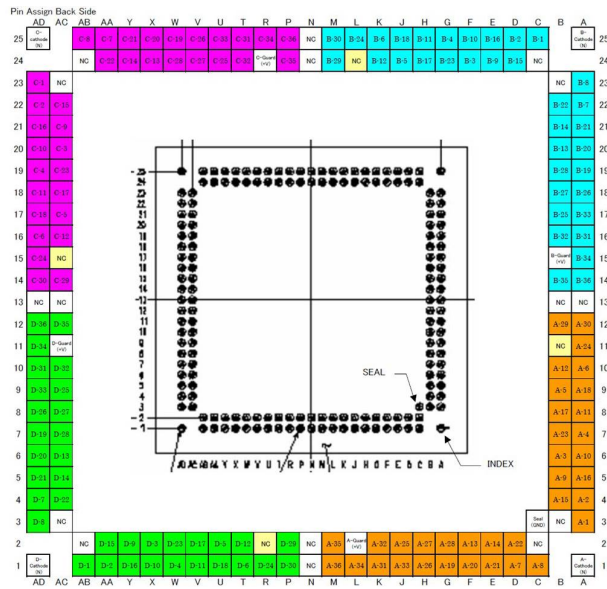


図 3.14: HAPD のチャンネル配置とピン配置

表 3.2: HAPD の各種パラメータ

外寸	75 × 75 mm ²	
入射面	合成石英	
光電面	材料	バイアルカリ
	感度波長領域	160 ~ 650 nm
	最大感度波長	400 nm
	有効面積	63 × 63 mm ²
	光電面印加電圧	~ 8,500 V
	打ち込み増幅	~ 1,800
	量子効率	28 %
電子増倍部	材料	APD
	1 チャンネル受光面積	4.9 × 4.9 mm ²
	1 チャンネル静電容量	80 pF
	APD 耐電圧	250 ~ 500 V
	Avalanche 増幅	30 ~
	チップ数	4
	チャンネル数 / チップ	36
総チャンネル数	144	
総増幅率	45,000 ~	

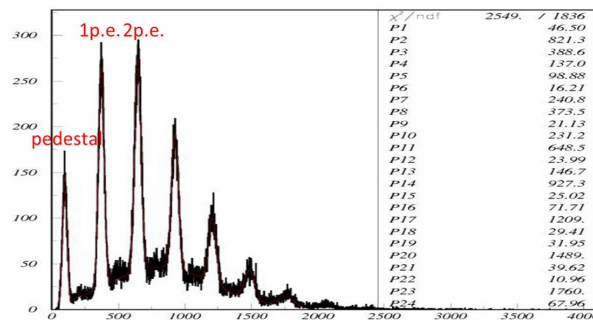


図 3.15: HAPD の波高分布の例。

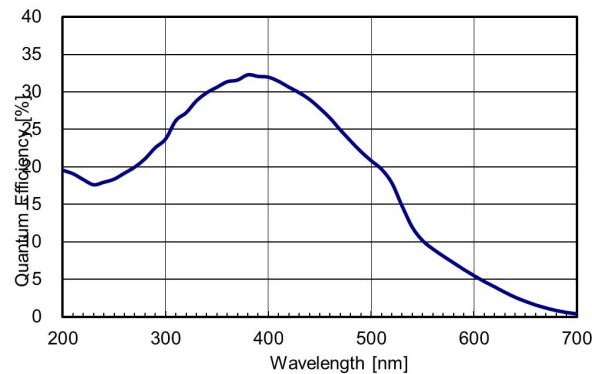


図 3.16: HAPD の量子効率の波長依存性

光検出器の開発状況

過去の先行研究により、HAPD の仕様は既に決定している。2013 年より HAPD の量産が開始され、現在はその性能評価が行われている。その結果をもとに最終的には実機で使用する 420 個の良品を選定する必要がある。量産版 HAPD の性能評価試験については第 4 章で報告を行う。

3.3.3 読み出しシステム

A-RICH は設置空間が非常に限られており、読み出しシステムには集積化が要求される。図 (3.17) に A-RICH の設置空間を示す。許される領域はビーム軸方向に対し 280 mm の範囲でありその中に、輻射体、Cherenkov 光拡大空間、光検出器、読み出し回路のスペースを確保しなければならない。エアロゲル、拡散距離、HAPD のサイズはそれぞれビーム軸方向に 40 mm、160 mm、30 mm と決まり、読み出しエレキの設置スペースは 50 mm しか残されていない。そこで我々は A-RICH の読み出しシステムを **Front-end (FE) board** と **Merger board** で構成するよう設計した。FE board は HAPD 1 台につき 1 機搭載され、その信号読み出しを行う。Merger board は複数台の FE board からの情報を統合し、後段のデータ収集 (DAQ) システムに情報を送る。これにより設置スペースを十分に抑えることが可能になる。図 3.18) に FE board と Merger board の構成の概念図を示す。

他にも、HAPD は 144 ch にピクセル化されており、実機では 420 個の HAPD を使用することからチャンネル数は全体で約 6 万チャンネルになる。多チャンネルの同時読み出しや HAPD の増幅率を補える高利得な増幅機能も必要である。これらの要求を満たすために FE board を ASIC と FPGA で構成した。

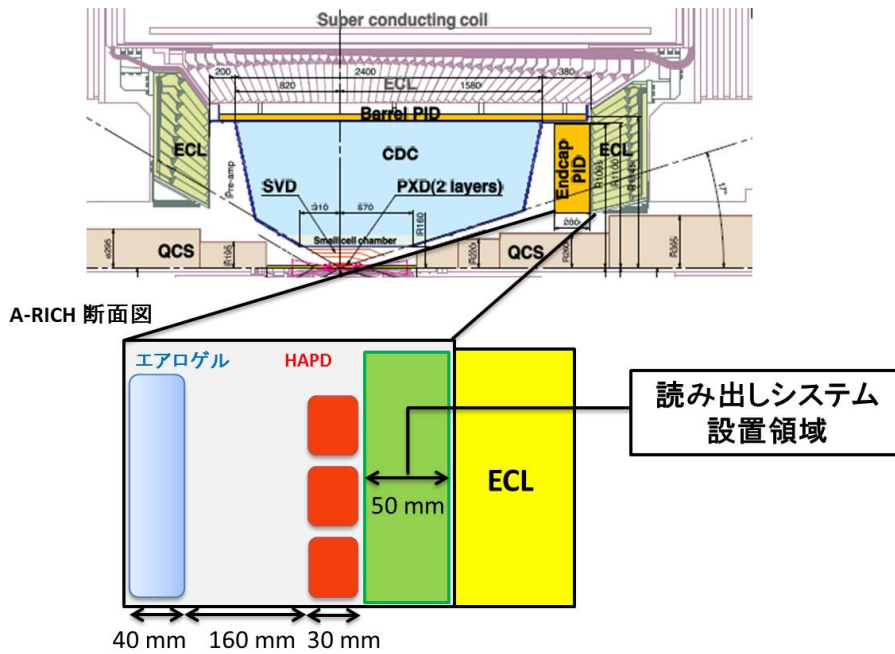


図 3.17: Belle II 検出器の断面図と A-RICH の設置位置

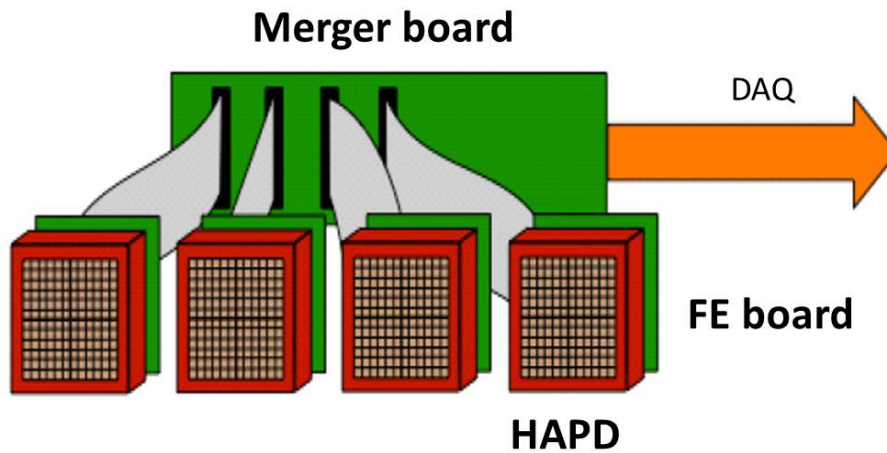


図 3.18: 読み出しシステムの概念図

Front-end board

Front-end board 内の電子回路の構成を図 3.19 に示す。RICH に重要なのはリングイメージを得るためのピクセルあたり 1 光子検出であり、HAPD 各チャンネルの光子検出の有無が重要である。そのため、読み出し回路の動作としては波高値の測定といったアナログ処理は必要なく、光子検出の有無というビット情報の処理だけで十分である。したがって、図 3.19 で最も重要なのは比較器 (comparator) であり、それより前段の増幅器 (Amp)

では増幅率の調整、波形整形 (Shaper) では波形立ち上がり時間の調整など、HAPD からの微弱な信号を判別しやすいように調整するものである。

図 3.19 の後半にあるシフトレジスタは ASIC からの光子検出の有無から得られたビット情報がある期間保持し、DAQ システムからの外部トリガーによって読み出せるようになっている。このデジタル信号処理を行う回路を FPGA で構築する。FPGA はハードウェア記述言語 (HDL) によって回路構成を自由に変更できる論理回路素子群からなる特殊な IC である。また、FPGA は前段の ASIC のパラメータ設定などの役割も担っている。

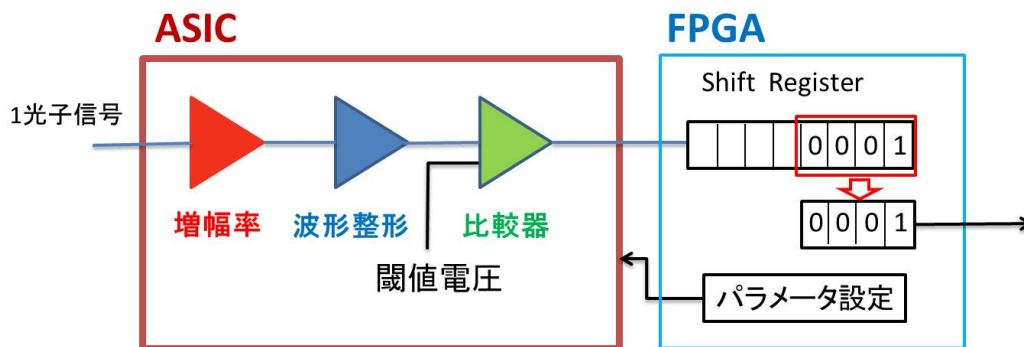


図 3.19: Front-end board 内部の電子回路の構成。前半のアナログ信号処理部を ASIC、後半のデジタル信号処理部を FPGA によって構築する。

比較器では、その他にも重要な機能であるオフセット調節機能を有している。比較器に与える閾値電圧 V_{th} が各 FE board の全チャンネルで共通であるため、チャンネル毎のオフセット電圧を調整することでチャンネル毎の検出効率を一定にすることができる。閾値電圧をチャンネル毎に設定する方法も考えられるが、そうしなかったのは閾値電圧を作り出す DAC (Digital Analog Converter) をチャンネル分 FE board に搭載しなければならず回路規模が大きくなってしまうからである。正確な信号処理のためオフセットは粗調節・微調節が各 16 段階の計 256 段階での調節が可能である。

増幅器、波形整形、比較器までのアナログ信号処理を行うのが ASIC である。ASIC は汎用 IC を組み合わせたような回路とは異なり、個別に設計を行い 1 つの IC とすることで高集積化が可能である。図 3.20 に実際の FE board の写真を示す。同図 (a) 左は FE board を HAPD に装着した様子である。同図 (a) 右は FE board 背面で HAPD の接続面であり、4 つの ASIC が搭載されている。

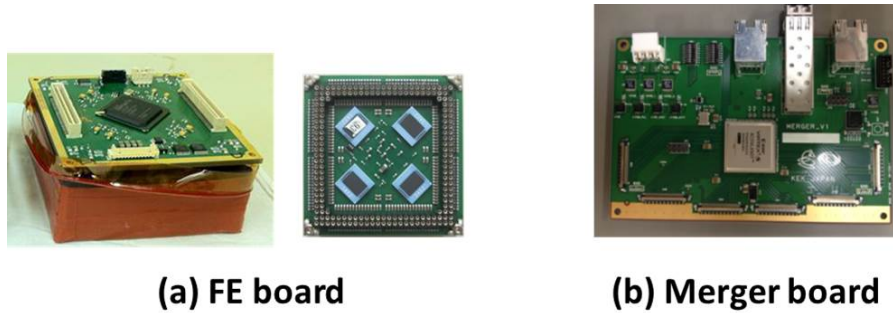


図 3.20: FE board と Merger board。(a) 左は実際に HAPD に FE board を装着した様子。(a) 右は FE board 背面。4 つの ASIC が搭載されている。

Merger board

Belle II 実験では elle2Link と呼ばれる検出器からのデータを光ファイバから読み出し収集するフレームワークを開発し、データフロー、トリガー分配を検出器間で共通化している。そこで現在 A-RICH の読み出しシステムを Belle2Link に対応させるための Merger board の開発を行っている。図 (3.20)(b) は現在開発が進められている プロトタイプの Merger board である。Merger board は複数台の FE ボードへのパラメータ分配や FE ボードが取得したデジタル信号を Merger board 上の FPGA でデータ圧縮し Belle2Link で送信を主目的としている。Merger board によりデータ量の圧縮とケーブル数の削減を行うことができる。

読み出しシステムの開発状況

FE board は最終の修正が行われており現在は量産準備中である。Merger board は FE board との通信、Belle II DAQ との通信も成功し、量産に向け準備中となっている。

3.4 プロトタイプ A-RICH の性能評価

2013 年 5 月に、プロトタイプ A-RICH の性能評価として、ドイツにある DESY 研究所のテストビームライン T24 を利用した電子ビームテストが行われた。この試験は 6 台の HAPD と読み出しシステムとして本測定仕様の読み出し ASIC を搭載した読み出ボードを用いて行われた。セットアップの外観図を 3.21 に示す。エアロゲルも実機で使用予定の屈折率 (上段: 1.0467、下段:1.0592) のものを 2 層配置した。更に HAPD 6 台を用いて 2×3 の配列とした実機仕様のプロトタイプを作成し、5 GeV/c の電子ビームを照射した。

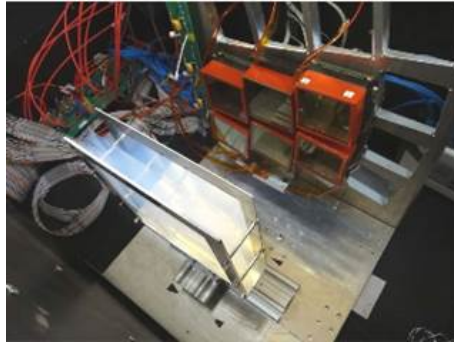


図 3.21: ビームテストのセットアップ外観図。エアロゲルは 2 枚、HAPD は 2×3 に配置し、ビームを垂直入射した。HAPD の読み出しには SA03 が搭載されているフロントエンドボードを使用している。

ビームテストにおけるリングイメージと Cherenkov 角度分布の観測結果を図 3.22 に示す。このリングイメージを解析した結果、1 ビームトラック当たりを検出された光電子数 N_{track} は 15.67 となり、Cherenkov ピークの σ より角度分解能は 10.79 mrad となった [17]。これらの値と A-RICH に飛来する最大運動量 4 GeV/c の K/ π の放射角度差 $\Delta\theta = 23$ mrad を以下の式に代入する。

$$(\text{識別能力}) = \frac{\Delta\theta}{\sigma_\theta} \sqrt{N_{p.e.}} \quad (3.4)$$

式 3.4 は 2 種類の粒子が作る RICH による粒子識別能力を表している。 $\Delta\theta$ は 2 種類の粒子による Cherenkov 光の放射角度差、 σ_θ は Cherenkov ピークの σ による角度分解能、そして $N_{p.e.}$ は 1 トラック当たりの検出光電子数に対応する。今回のビームテストにおいて 4.82σ の識別能力があることがわかり、A-RICH に要求される性能を達成できることが確認された。

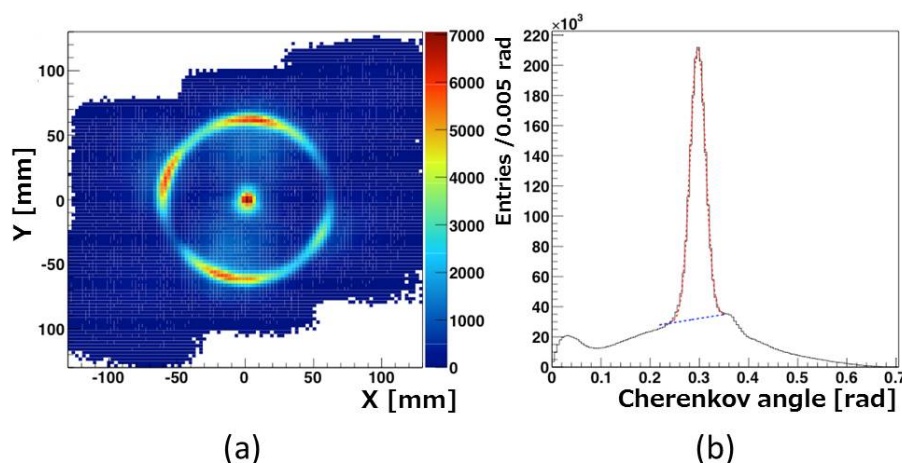


図 3.22: プロトタイプ A-RICH のリングイメージ観測結果。(a) 全トラックのヒット分布を積算して得られるリングイメージ。(b) HAPD の各受光チャンネルと粒子の通過位置との距離から計算した Cherenkov 光放射角度分布図。

3.5 シミュレーションによる評価

Belle II 実験では物理解析や検出器シミュレーションを行うソフトウェアフレームワークとして Belle II analysis and simulation framework (BASF2) がある。BASF2 では Belle II 検出器を構成する各。検出器のジオメトリーは本測定時の仕様が用意されており、A-RICH も実機仕様のものが再現されている。輻射体には 2 枚のエアロゲル (上段:1.045、下段:1.055) を用いたマルチレイヤー方式、光検出器には 420 個の HAPD が実機と同じ配置で設置されている。検出器の光電面の量子効率を 30 % としてバイアルカリが蒸着されたものを用意し、モンテカルロシミュレーションによる A-RICH の応答特性の確認、及び性能評価を行った。シミュレーション結果を図 3.23 に示す。同図が示すようにほとんどの運動量領域で K 中間子を誤識別する確率が 1 % で識別できる確率が 95 % 以上を得られることがわかり、A-RICH に要求される性能を満たしていることが確認された。

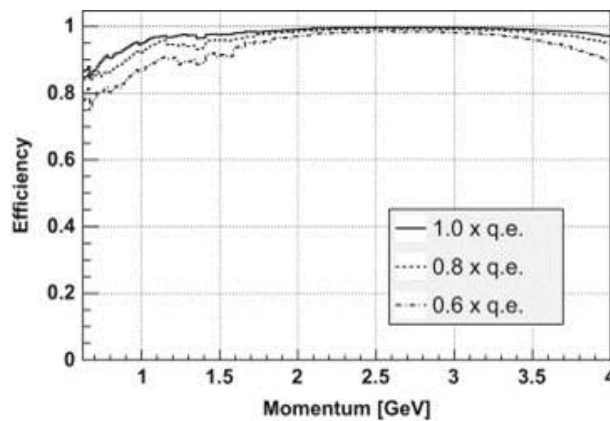


図 3.23: シミュレーションによる A-RICH の性能評価結果。光検出器の量子効率毎の K 中間子を誤識別する確率が 1 % の時の、運動量に対する K 中間子の識別できる確率の推移。

4 読み出し ASIC の性能評価

A-RICH では 144 ch HAPD を 420 個使用するため、読み出しには合計で約 6 万チャンネルを要する。そのため多チャンネルの同時読み出しや、HAPD の低増幅率を補うための高利得、低雑音の読み出し回路が要求とされた。

そこで A-RICH グループは専用の読み出し ASIC である「SA シリーズ」の開発を行ってきた。「SA シリーズ」では第 1、第 2 バージョンとして SA01、SA02 が製作され、先行研究で基本的な性能を満たすことが確認された。その後、HAPD の放射線損傷由来のノイズ低減のため、波形整形回路の時定数を短くした SA03 の開発も行われた。性能評価結果から SA03 が最終版となり、2013 年には SA03 の量産が行われた。

SA03 の量産では 2,520 個のチップを作成し、その中から実機で使用する 1,620 個を決定する必要がある。そのための SA03 の基本性能である増幅率、オフセット調節機能を評価項目とした検査システムの開発を行い、良品の選定を行った。本章では SA シリーズの開発背景、ASIC の基本性能、量産版 SA03 評価のために開発した『検査システム』、そして、量産版 SA03 の検査結果について述べる。

4.1 読み出し ASIC 「SA シリーズ」の概要

フロントエンドでの読み出し電子回路として我々は専用の読み出し ASIC である「SA シリーズ」の開発を行ってきた。その回路構成を図 4.1 に示す。以下で SA シリーズの基本構成と動作について解説する。

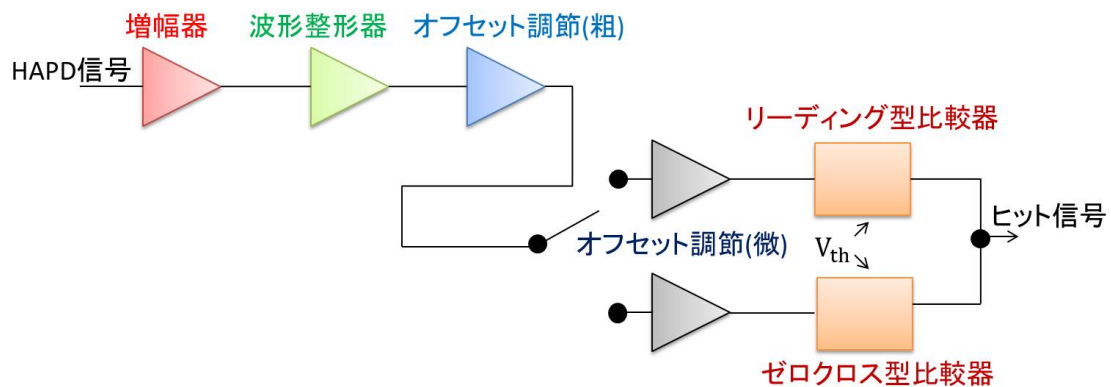


図 4.1: SA シリーズの基本回路構成。増幅器 (Amp.)、波形整形器 (Shaper)、2 種類のオフセット調節回路の後、2 種類の比較器 (Comparator) により信号の検出を行う。比較器は内部スイッチにより選択可能である。

増幅器

SA シリーズの ASIC は ROHM CMOS 0.35 μm のプロセスでデザインされている。搭載される増幅器は電荷有感型であり、内部スイッチにより帰還容量を変更することで 4 段階の増幅率に変更することができる。最も高い増幅率 (Gain0) を基準 (= 1) とすると 1 : 1/2 : 1/3 : 1/4 となるように設計されている (図 4.2)。

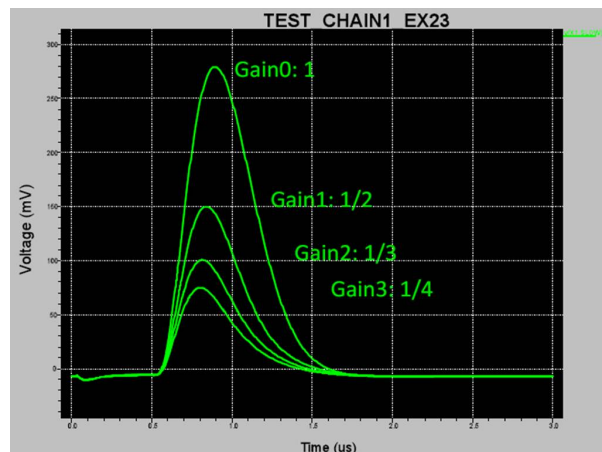


図 4.2: 増幅器の動作シミュレーション。ただし出力波形は波形整形器によって波形整形が行われた直後の様子である。

波形整形器

波形整形器は波形立ち上がり時間を調節する非反転増幅器と Pole-Zero 補償回路から構成されている。増幅器からの出力は数 μm 程度の長い波形なのでこれを数百 ns オーダーまで短縮させるとともに、その際のアンダーシュートを生じさせないための Pole-Zero 補償を行う。波形整形時間の調整が一番長い設定を基準 (= 1) とすると 1 : 1/2 : 1/3 : 1/4 の 4 段階に変更可能である (図 4.3)。

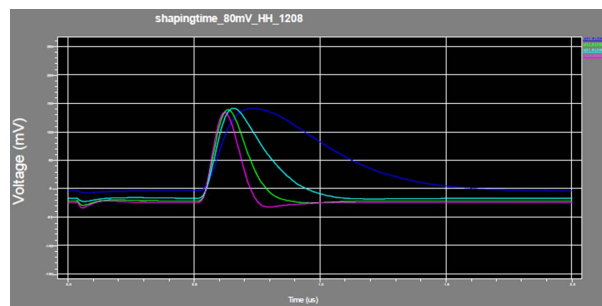


図 4.3: 波形整形器の動作シミュレーション。波形整形により 4 段階の立ち上がり時間に調節が可能である (シミュレーション)

オフセット調節回路

1 光子検出を正確に行うには各チャンネル毎に適切な閾値電圧 (Threshold Voltage : V_{th}) を与える必要がある。しかし、そのためにはチャンネル数分の DAC (Digital-Analog Converter) が必要となる。そこで SA シリーズではフロントエンド回路に搭載する DAC を各ボードで 1 つにして閾値電圧を全チャンネル共通にし、チャンネル毎のオフセット電圧を調節する方式を採用した。そのため粗調節 16 段階、更に粗調節毎に微調節 16 段階に設定が可能で計 256 段階にオフセットが調節可能である (図 4.4)。

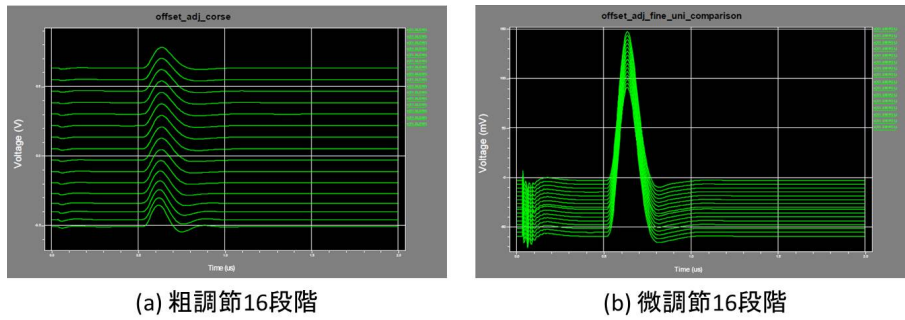


図 4.4: オフセット調節回路の動作シミュレーション。(a) 粗調節 16 段階、(b) 微調節 16 段階の 2 段階構成となっている。

比較器

比較器は入力信号と閾値電圧を比較し、閾値電圧以上の入力がある間だけ矩形信号を出力する回路である。出力された信号は入力に関係ない定電圧で出力されるため、後段ではデジタル信号入力として処理することができる。SA シリーズでは 2 種類の比較器を選択できるようになっている。一つはリーディング型と呼ばれるもので一般的な比較器である。動作原理を図 4.5(a) に示す。図の閾値電圧 V_{th} (同図 (a) 赤線) を入力信号 (同図 (a) 緑線) が超えた時に比較器からの出力 (同図 (a) 青線) が立ち上がり、入力信号が閾値電圧を下回った時に出力が終了している。ベースライン電圧が閾値電圧を上回っている状態では出力はされない。これにより定常ノイズを除去することができる。

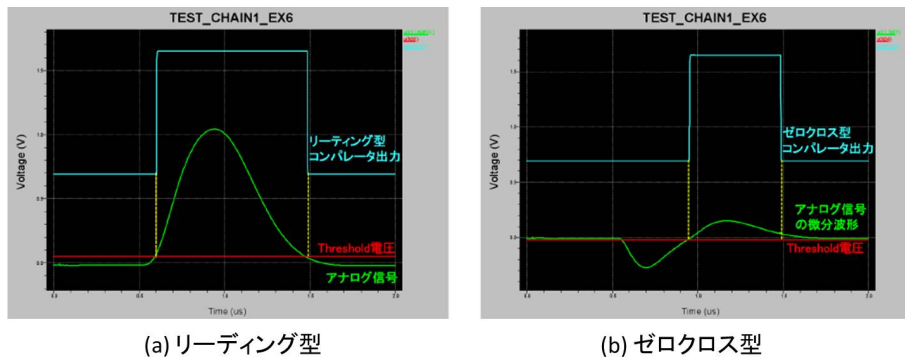


図 4.5: 比較器の動作シミュレーション同図 (a) はリーディング型比較器の動作。入力信号と閾値電圧を比較しデジタル信号を出力する。同図 (b) はゼロクロス型の動作。入力信号を微分回路で微分し、電圧変化の情報を取得した後、リーディング型比較器に通し出力判定を行う。

もう一つはゼロクロス型と呼ばれ、入力信号のピークの検出の有無によりデジタル出力を行う比較器である。その動作原理を図 4.5(b) に示す。入力信号のピーク的位置を得るために、微分回路によって微分処理を行う。その微分波形を反転させた信号 (同図 (b) 緑線) と微分波形のベース電圧をリーディング型比較器で比較することで、元の入力信号がピークに達したタイミングからデジタル信号 (同図 (b) 青線) を出力することができる。リー

表 4.1: SA シリーズの設定可能なパラメータ一覧

global パラメータ		
パラメータ略称	機能	SW
PHASECMPS	位相補償用帰還容量の設定	2bit
GAIN	増幅率の設定 (3=min、0=max)	2bit
SHAPINGTIME	波形整形の時定数の設定 (3=min、0=max)	2bit
COMPARATOR	比較器の選択 (0=リーディング型、1=ゼロクロス型)	1bit
VRDRIVE	比較器出力回路の調節	8bit
MONITOR	モニターする信号の選択	2bit
ID	チップ識別子 (設定不可、読み出し専用)	9bit

channel パラメータ		
パラメータ略称	機能	SW
DECAYTIME	増幅器出力信号の減衰時間の設定	3bit
OFFSET	オフセット粗調節	4bit
FINEADJ __ UNIPOL	UNIPOL 出力 ¹ のオフセット微調節	4bit
FINEADJ __ DIFF	DIFF 出力 ² のオフセット調節機能	4bit
TPENB	テストパルスの使用許可 (1=不可、0=可)	1bit
KILL	チャンネルの使用許可 (1=不可、0=可)	1bit

ディング型だけを使用した場合に比べ回路が複雑になるがデジタル出力のタイミングが入力信号の波高値に依存しないという特徴がある。

A-RICH 検出器で SA シリーズを使用する時は通常はリーディング型を使う予定である。

パラメータ設定回路

SA シリーズにはアナログ処理回路に加え、増幅率や Shaping time などの回路パラメータを設定するデジタルスイッチング回路が備わっている。設定パラメータは大きく分けて 2 種類あり、全チャンネル共通に設定される「global パラメータ」と、各チャンネル毎に設定される「channel パラメータ」がある。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、global パラメータ設定回路は一基、channel パラメータ設定回路はチャンネル数分だけ 1 つの ASIC に搭載される。表 4.1 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、設定スイッチのビット数を表している。

¹UNIPOL 出力はリーディング型への入力に対応

²DIFF 出力はゼロクロス型への入力に対応

4.2 SA01、SA02 の概要

SA シリーズの第 1 版として試作された SA01 は HAPD 専用読み出し電子回路としての基本性能をほぼ満たしていることを確認した [18]。しかし SA01 は読み出しチャンネル数が 12 と少ないこと (HAPD 全 144ch を読み出すには SA01 が HAPD 1 機で 12 個必要になる)、実際の HAPD の増幅率が想定より高く SA01 での増幅によって出力信号が飽和してしまうなどの課題を残していた。これらを踏まえ 2010 年に開発された SA シリーズ第 2 版である SA02 では以下のような設計改良が行われた。

- チャンネル数を 12 から 36 に増加させた。
- 増幅器の増幅率を全体的に 1/4 に減少させた。
- ゼロクロス型比較器の閾値電圧を調節可能にした。
- 位相補償用の MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 容量を増加させた。

チャンネル数の増加は読み出し回路への要求である多チャンネル読み出しと高集積化を実現するためのものである。この変更により HAPD 1 台で必要な ASIC は 4 つとなり読み出しシステムの規模の縮小につながった。増幅率の減少は ASIC からの出力信号の飽和を抑制するためである。特に HAPD で特に感度のある 1 光電子相当の入力に対して線形性が保たれた十分なダイナミックレンジを確保できるよう設計されている。ゼロクロス型比較器の閾値電圧調節は SA01 では閾値電圧が固定値であったのに対し、リーディング型同調節可能となった。位相補償機能の増強は SA02 において位相差による増幅波形の発振を抑制するためのものである。

4.3 SA03 の開発と性能の改良

SA02 は A-RICH で要求される性能を十分に満たすことが確認された [19][20]。SA02 では shaping time の設定値を最短で 250 ns としていた。ここで HAPD からの信号読み出し時での等価雑音電子数³ (σ) は以下の式で表すことができる。

$$\sigma^2 = \frac{(AC)^2}{\tau} + \frac{1}{e} I_{\text{leak}} FG\tau \quad (4.1)$$

右辺の A は信号処理回路に依存する定数、 C は検出器容量、 e は素電荷の値、 I_{leak} は APD のリーク電流、 τ は Shaping time、 F はノイズ因子 (~ 2)、 G は HAPD の APD 部分の増幅率を表す。式 4.1 により HAPD のリーク電流 (I_{leak}) が増加するとノイズ量もそれに伴い増加することがわかる。第 3 章に記述したように HAPD は Belle II 実験中に中性子による損傷を受け、リーク電流が増加し読み出し時のノイズ量が增大することが予想される。

³読み出し回路からの出力雑音に対応する入力電荷量を素電荷の個数で表したものの。

SA03 では Shaping time を最適化することによって読み出し時のノイズ量を抑えられるよう改良した。Shaping time の最適値は 2010 年に行われた中性子照射試験で照射された APD のリーク電流と読み出しエレキの Shaping time の関係から算出した。図 4.6 は式 (4.1) に τ と実測で得られた I_{leak} を代入した時に得られた等価雑音電子数の関係である。これにより、Shaping time を $100 < \tau < 200$ [ns] 付近に調節すれば読み出し時のノイズ量を最小限に抑えることができると予想される。そのため SA03 では Shaping time をこの範囲に調節できるよう改良した。

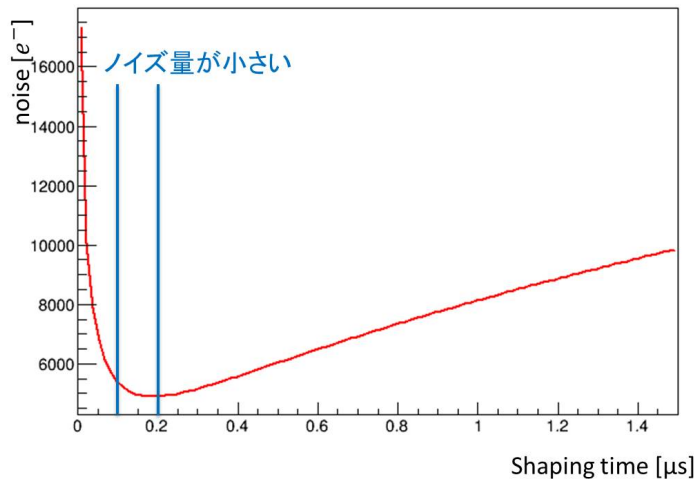


図 4.6: Belle II 10 年分の中性子が照射された APD からの予想されるノイズの Shaping time の関係。

もう 1 つ SA03 への主な改良点として、非破壊読み出し方式の導入が挙げられる。SA02 これは、従来の SA シリーズでパラメータ (表 4.1 参照) の制御を行ってきたシフトレジスタに設定データ保存用のレジスタを追加するものである。SA02 までと SA03 のレジスタの構成を図 4.6 に示す。

SA02 までは書き込んだパラメータを確認するために、再度パラメータに相当するデータ列を書き込み、レジスタから押し出す必要があった。これでは実際の実験中でパラメータを読み込むたび、2 度書き込みを行うのでパラメータ設定時間の不感時間が測定的不安定さの原因となってしまう。これを防ぐために 2 度目の書き込みで 1 度目の書き込みの破壊を行わない「非破壊読み出し方式」を SA03 では採用する。図 4.7 下図のように、パラメータ書き込み時は「読み出し用」と「データ保存用」の 2 つに分けたレジスタに同時に書き込む。読み出しレジスタは外部にデータをシフトさせる従来までのレジスタと基本的には同等の役割を果たす。新しく追加した保存用レジスタは次の書き込みがあるまでデータ列を保持し続けている。読み出し要求があった時は、保存用レジスタから読み出し用レジスタへデータをコピーし出力させることで、余計な書き込み動作をなくすることができる。書き込まれたパラメータを保持し続けることから非破壊読み出しと呼ばれる。SA03 では従来の読み出し方式は使用できず、非破壊読み出し方式のみを使用することができる。

SA03 は Spice シミュレーションやデジタル回路シミュレーションによる動作検証といった開発をすでに終え、すでに 2014 年 2 月に量産が完了している。

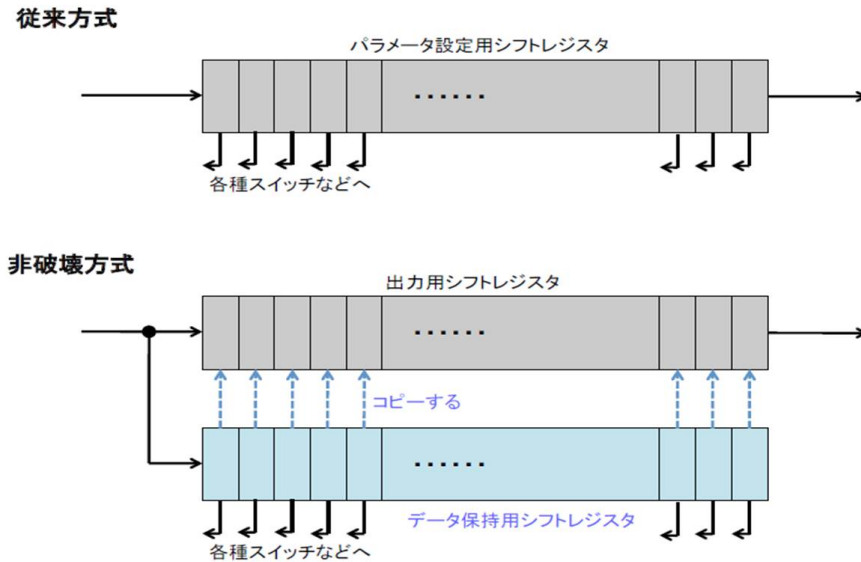


図 4.7: 従来の SA シリーズと SA03 のシフトレジスタの構成の比較。データ保存用シフトレジスタを追加することで非破壊読み出しが可能となった。

SA03 チップは「QFP」と「LTCC」という2つのパッケージで試作した。図 4.8 に本体 IC であるベアチップと QFP、LTCC パッケージの外観を載せる。QFP(Quad Flat Package) は一般的な表面実装型 IC パッケージの一種で矩形外装の4辺から端子が出ている形状となる。4辺の配線のためパッケージサイズが大きくなってしまふ。LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramics⁴) パッケージは配線パターンを表層・内層に形成できるので多層化も可能なこと、またパッケージの背面で BGA (Ball Grid Array) 実装を行うことで周囲に端子を張り出さず実装面積を小さくできること、外部基盤に実装されていたコンデンサ等もパッケージ内に実装できることからシステム全体を小型・集積化できる。

パッケージの製作の難度は LTCC が集積化している分 QFP より高くなる。そのため、SA03 の動作試験用として QFP を製作し、動作確認後に実機用の LTCC を製作した。LTCC も動作確認を行い実機では LTCC を使用することが決定した [20]。

⁴低温焼成積層セラミックス基板の略であり、配線導体とセラミックス基材を約 900° 以下で低温焼成したものである。基材がセラミックスであるため耐熱性・耐湿性に優れ、高周波回路において良好な周波数特性が得られるなど優れた点を多くもつ。

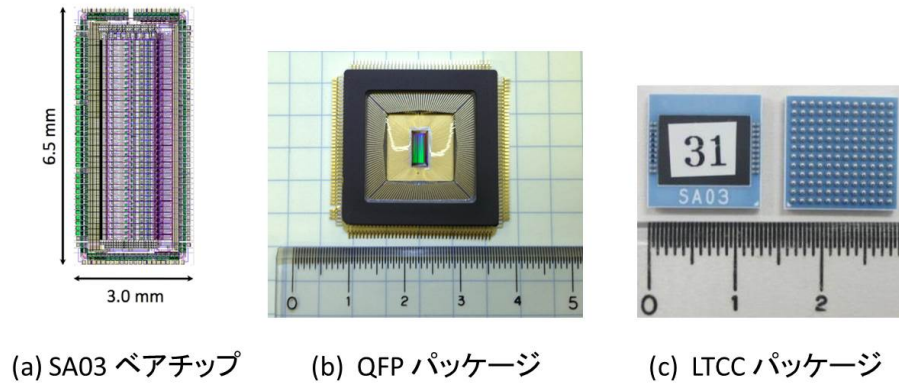


図 4.8: SA03 ベアチップ (a) と各パッケージの外観 (b)(c)。(b) が QFP、(c) が LTCC。QFP は表面実装型、LTCC は背面がボールグリッド実装となっている。

4.4 SA03 の量産

SA03 の量産は 2013 年より開始され、2014 年 2 月に完了している。製作された SA03 ベアチップは全部で 4000 チップで、実際に LTCC としてパッケージ化されたのは 2520 個である。

先に既述したように、SA03 の量産は既に完了している。最終的に SA03 は 2520 個作られたわけだが、量産時に 1 つ問題が生じていた。SA03 のパッケージ化を委託した会社が、ベアチップを $6.8 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ にカットするはずが、 $7.4 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ と間違ったサイズにカットしてまったため、図 4.9 のように LTCC のキャビティ部⁵にベアチップが収まらないという事態が生じた。そのため、一部の SA03 でベアチップの再カットが必要になってしまった。まずは再カットによる影響の有無を確かめた。評価結果に関しては後に述べる。

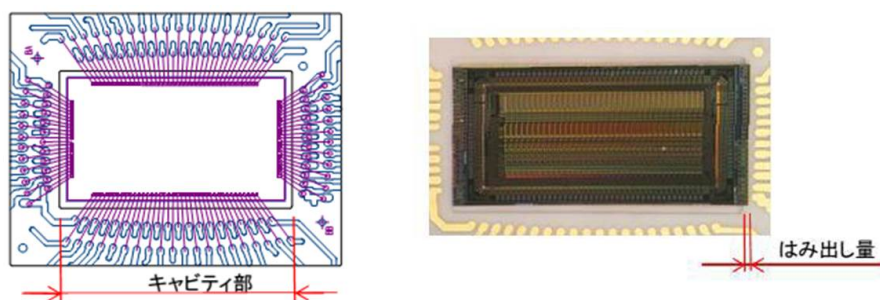


図 4.9: LTCC キャビティ部 (左図) と間違ったサイズにカットされたベアチップ (右図)。

⁵LTCC 基盤の、実際にベアチップが実装される箇所

4.4.1 検査システムの開発

量産された 2520 個全ての基本性能を評価し、1680 個の実機使用品を選定するための『検査システム』の開発が必要となった。そこで、複数の SA03 と並列に通信を行い、全数を迅速に性能評価できる専用の検査ボードを設計し、開発した。以下では、検査ボードの性能と実際に行った性能評価について記述する。

検査ボードの概要

検査ボードは、メインボードとサブボードの 2 種類の独立したボードを組み合わせた構成になっている。メインボードには回路制御や SA03 からのヒット信号処理を行う FPGA や電源コネクタなど様々な素子が設置され、サブボードには SA03 の LTCC パッケージを接続することができる BGA タイプのソケットを設置した。BGA タイプのソケットは、SA03 の背面から出たボール状の電極をソケット側のピンで挟み込むことで出力を読み出す。図 4.10 にその外観を示す。

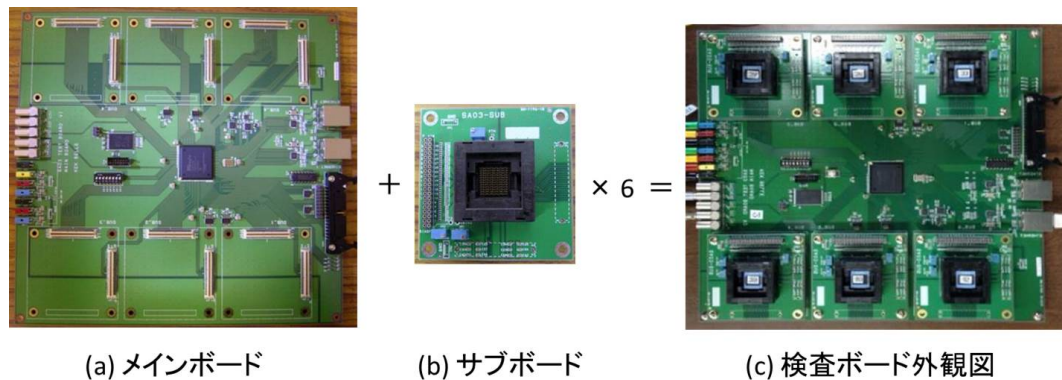


図 4.10: 検査ボードを構成するメインボード (a)、サブボード (b) とそれらを組み合わせた完成品 (c)

メインボードの上にスタンド型のコネクタが配置されており、その上にサブボードを接続することができる。メインボードをサブボードを分けた理由は、メインボード側の素子が壊れた場合、またはサブボードのソケットが壊れた場合のどちらかが発生した時に、検査ボードすべてが使えなくなってしまうというリスクを回避するためである。どちらかが破損した場合には片方を取り替えれば良いことになる。サブボードは最大 6 個、メインボードに接続することができるため、最大で同時 6 個の SA03 をテストすることができる。

SA03 とのデータ通信、および FPGA や SA03 の制御などは SiTCP 通信を用いて行う。検査ボードでは、安定した高速データ通信が可能で回路規模を小さくしたいため SiTCP 通信方式を採用した [21]。また、通信にはイーサネットケーブルを用い、通信の高速化を行っている。一本のイーサネットケーブルで TCP 通信によるデータの取得と UDP 通信によるパラメータの設定を行うことができる。図 4.11 に通信システムの概念図を示す。

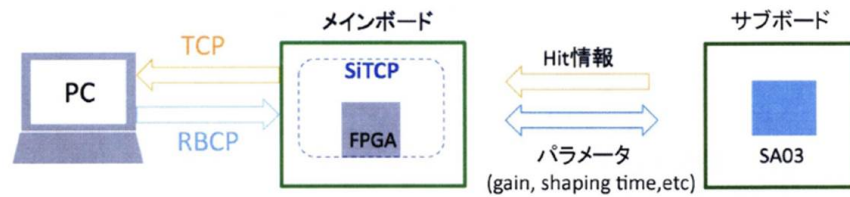


図 4.11: 検査システムの通信の概念図

検査ボードの設計・開発

検査ボードに搭載した FPGA は Xilinx 社製の Spartan6 [22] を使用しており、パッケージは FG(G) 676、デバイスは XC6SLX100 を使用した。また、メインボード回路内に ROM を搭載することで FPGA に設定したパラメータを保存することができる。これにより、回路電源を落としても再度、FPGA にパラメータを書き込む必要がなくなる。ROM は本 FPGA に対応した XCF32PVOG48C を採用している。

FPGA のピン数の制限により、SA03 は最大で 6 個まで接続可能であったため、メインボードには 6 個のサブボードを接続できるよう設計された。また、SA03 の性能評価を行うため閾値電圧出力を行う DAC の機能が必要である。そのため、ポテンショメータ AD5235 [23] を採用した。AD5235 は 10 bit で制御できるため 1024 段階の閾値電圧の設定が可能である。また、SA03 からのアナログ信号をモニターするために 3 bit のマルチプレクサ CD74HC4051E [24] を設置した。これにより 6 個の SA03 からどの信号をモニターするか選択することができる。メインボード上のディップスイッチは SiTCP 通信のアドレス設定のため、また、イーサネットケーブルのコネクタには一般的に使用されている LAN8710 [25] を採用した。

検査ボード性能評価

検査ボードの製作を GND(株) 社に依頼し、6 枚のメインボードと 22 枚のサブボードの完成品が 2013 年 10 月に首都大学東京に届いた。到着後、検査ボードの性能評価を行った。検査ボードの電源はデジタル用電源 (+ 3.3 V)、アナログ用電源 (± 1.65 V) の 2 つに分かれ、それぞれが正常に電圧がかかることを確認した。その後、JTAG を介し、PC とメインボードを接続し FPGA にファームウェアの書き込みを行った。書き込みに使用したプログラムは (株)Xilinx 社の ISE DESIGN SUITE である。書き込みは成功し、実際にボードを動作させることができるようになった。しかし、検査システムを構成する閾値電圧生成のための DAC の機能や、複数の検査ボード制御に必要な MAC アドレスの書き込みの機能の確認も必要であるため、以下ではそれらについての評価を述べる。

a 閾値電圧の設定

採用した DAC AD5235 は 1024 段階 (10bit) の出力電圧の調整が可能で各段階毎の DAC の出力電圧を知ることで適切に閾値電圧を設定することができる。DAC の出力は図 4.12 に示すようにメインボードの VTH1 から採ることができるため、その出力をデジタルマ

マルチメータにつなげ、PCでDACの設定値を制御しながら全1024段階の出力をモニターした。結果を図4.13に示す。DACの設定値と出力電圧は線形関係になるはずが、等間隔で出力電圧が落ちる箇所が見つかった。落ちていた箇所は64ステップ毎であり、落ちる前の出力電圧に回復するのに8ステップかかることが分かったため、ソフトウェアで対策ができる。出力が落ちる部分を排除した時のDACのステップに対応する出力電圧の結果を図4.14に示す。この改良によりステップを変えたときに、同じ閾値電圧に設定されてしまう問題を回避することができる。線形性も得られたので、全ステップの出力電圧を測定し、その値をテーブル化することで、設定したDACのステップ毎に測定値を設定できるようした。この方法を取り入れることにより、実際に測定値を閾値電圧として設定できるので測定精度を向上させることができる。閾値電圧のテーブルは検査システムで使用する検査ボード全てで用意している。

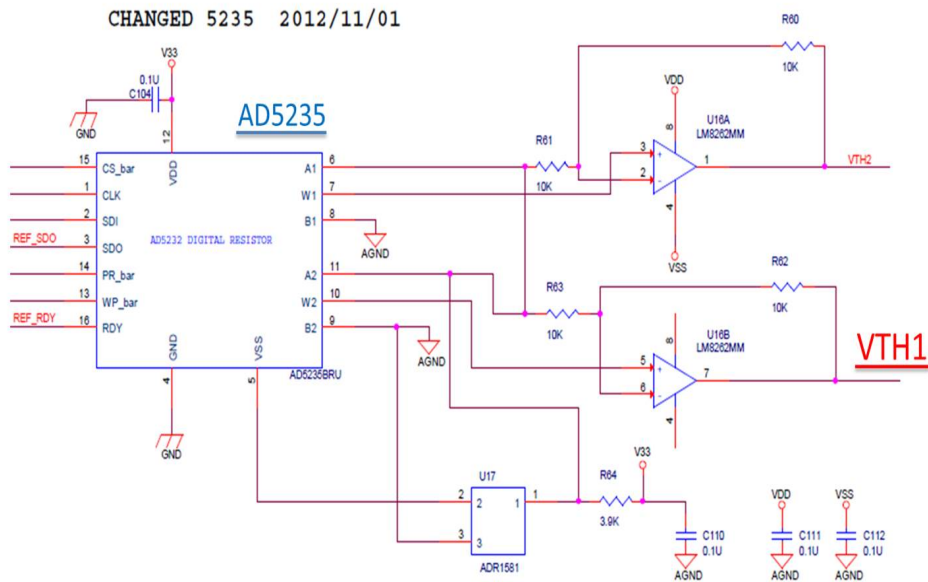


図 4.12: メインボード内の DAC 付近の回路図

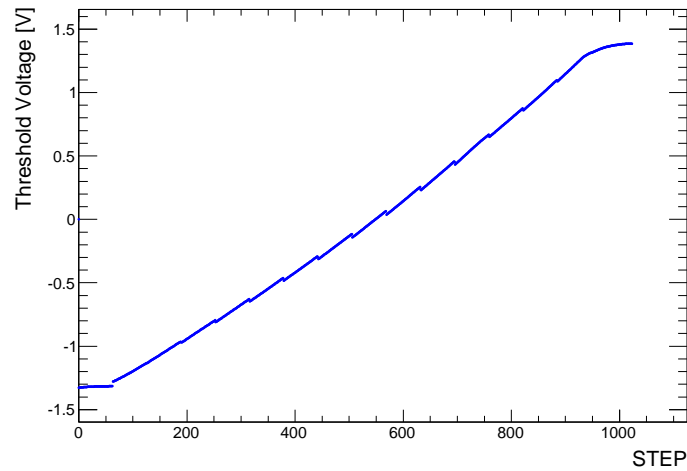


図 4.13: DAC 出力をモニターした結果。

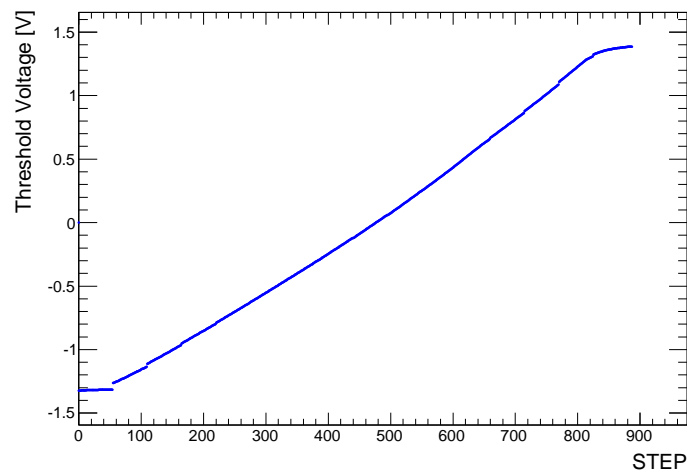


図 4.14: ソフトウェア改良後の DAC のステップに対応する出力電圧

b MAC アドレスの書き込み

検査システムでは検査ボードを複数使用し、同時に大量の SA03 の性能評価を行った。制御の簡易のためには、1つのネットワーク下で検査システムを構築するために、検査ボード1つ1つに個別の MAC アドレスを用意し、ネットワーク環境下で検査ボードを識別できるようにした。PC と検査ボードをイーサネットケーブルを介し接続し、MAC アドレスの書き込みを行った。書き込み先は検査ボード内の ROM である。書き込み用プログラムは Windows 環境下で使用できる SiTCMPcWriter.exe を用いた。図 4.15 に実際に書き込んだ様子と、無事に書き込みに成功した結果を示す。

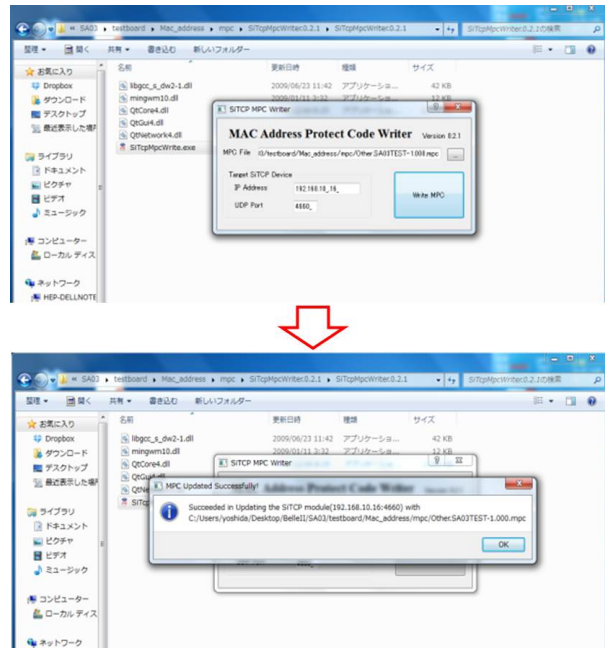


図 4.15: MAC アドレス書き込みの様子

4.4.2 検査システムのセットアップ

検査システムの実際の構成を図 4.16 に示す。1 台の解析用 PC と、3 台の測定用 PC、そして 3 枚の検査ボードで構成しており、1 枚の検査ボードを 1 台の測定用 PC で制御・データ取得を行う。そして順次データを解析用 PC 転送して解析を行うという流れである。測定用と解析用に PC を分けた理由は、解析に時間がかかるため測定と解析を平行に行うことで、効率的に測定数を増やすことができるからである。また、取得したデータを 1 つの PC に集約することで、評価する際の処理が簡易化した。

図 4.16 に示した以外にも、それぞれの検査ボードには電源電圧 (TEXIO 社製 PW18-1.8AQ)、ファンクションジェネレータ (NF 社製 WF1973) が 1 つずつ接続されている。表 4.2 に設定した電源電圧を示す。測定・解析用 PC の OS には CentOS 5.11 を採用した。検査システムでは以下で示す性能評価のための測定は、チップの付け替え以外すべて自動化を実現している。

表 4.2: 検査ボードの設定電圧

設定値	用途
3.3 V	デジタル部電源電圧
± 1.65 V	アナログ部電源電圧

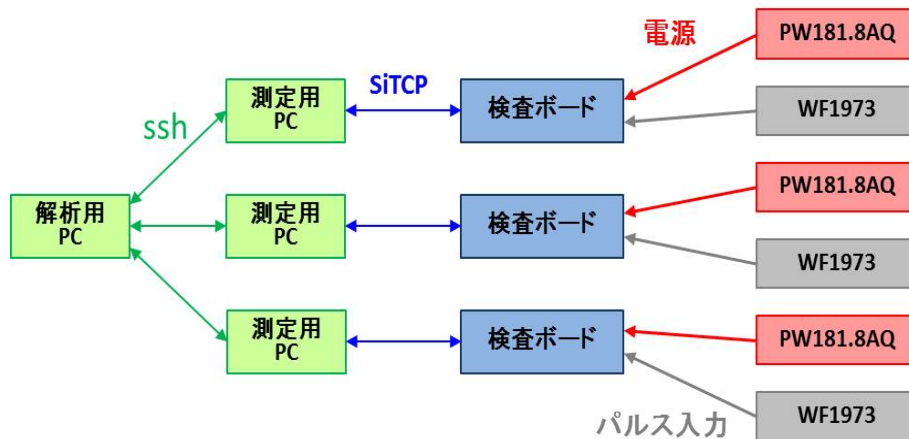


図 4.16: 検査システムの実際の構成

4.4.3 量産版 SA03 ナンバリング

量産された SA03 の 1 つ 1 つを評価するに当たり、生産した SA03 の個体識別が必要である。しかし、SA03 の製作時に シリアル番号を付けていないため SA03 1 つ 1 つにシリアル番号を用意し、チップに記述するという方法をとった。首都大に 320 個入りのパックが 1 つ、550 個入りのパックが 4 つの状態 SA03 が届いたため、そのパックにも番号を振り、SA03 には A0 から A99、B0 から B99、そして C0 から Z19 という順番でシリアル番号を記述していった。

SA03 をフロントエンドボードに搭載するに当たり、はんだで BGA 部を溶かして接続することになるが、その際 SA03 には 数百 °C の熱が加わる。通常のインクではこの温度で溶けてしまう。これを防ぐため、数百 °C にも耐えうる耐熱ペン (edding 社製 780) を用意し、シリアル番号の記述を行った。図 4.17 に購入した耐熱ペンと実際にシリアル番号を記述した様子を示す。



図 4.17: 耐熱ペン (a) と実際にシリアル番号を記述した様子 (b)。耐熱ペンの型番は

4.4.4 不良チップ率の確認

SA03 量産時の不具合により再カットを行ったため信号を読み出せないチャンネルを含む個体が存在する可能性があるため、2520 個の量産品の中からランダムにサンプリングを行い、Threshold scan による信号出力の有無を確認した。この際に、SA03 にはテストパルスから 300 mV の疑似信号を入力している。結果を表 4.3 に示す。信号ありの定義は入力エントリー数が 0 でないもの、信号なしの定義は入力エントリーが 0 になっているものである。検査した 300 個のうち信号なしを含むチップ数は 12 個であった。この結果から不良チップ率は 4% と十分に許容範囲である。

表 4.3: ランダムサンプリングによる不良チップ率の確認

サンプル数	全チャンネル信号出力ありのチップ数	信号出力なしのチャンネルを含むチップ数
300	288	12

4.4.5 性能評価方法

SA シリーズの出力信号は 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、『Threshold scan』と呼ばれる比較器の閾値電圧とヒット分布の相関を見る手法により間接的に波高値に関する情報を得ることができる。具体的な測定方法を以下に示す。

1. 閾値電圧 V_{th} の初期値 V_{th0} を設定する
2. 測定したい範囲の最大の閾値電圧 V_{th} である V_{thmax} を設定する
3. パルスジェネレータから N 回トリガーを受け、入力が V_{th} を超えたヒット数を記録する
4. テキストファイル内の V_{th0} から V_{thmax} の範囲でのヒット数分布をつくる

この測定は全て測定用 PC により自動で行われる。測定時には V_{th0} , V_{thmax} , N の設定パラメータとして入力する。

次に Threshold scan の解析方法について解説する。図 4.18 はその概念図を示す。左側の波形は比較器に入力される直前のアナログ信号を表し、右側の分布は入力信号を比較判定した結果であり、閾値電圧 V_{th} を縦軸に取ったヒット分布である。

図 4.18(a) は何も入力がなくノイズのみを測定した時の結果である。ノイズの波高分布は確率分布的に Gauss 分布に従うため、ヒストグラムのピークは Gauss 関数で近似することができる。この Gauss 分布の標準偏差 σ をノイズの波高値と定義する。また、Gauss 分布の中心値 μ からそのチャンネルのオフセット電圧がわかる。

図 4.18(b) はテストパルス入力時のような理想的な状態での Threshold scan の結果である。ノイズがほとんど無く毎回同じ形のパルスが入力された場合、Threshold scan の結果は矩形の分布となる。 V_{th} の低い方の緑がオフセット電圧に、高い方の緑がパルスの最大値に対応する。つまり 2 つの緑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 $\text{erfc}(x)$ と呼ばれる次の式を使用する。

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\pi}^x e^{-t^2} dt \quad (4.2)$$

式 4.2 は近似させる緑によって以下のように使い分ける必要がある。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{V_{Th} - \mu_{sig}}{\sqrt{2}\sigma_{sig}} \right) & : (\text{upper side}) \\ \frac{1}{2} \text{erfc} \left(-\frac{V_{Th} - \mu_{ofs}}{\sqrt{2}\sigma_{ofs}} \right) & : (\text{lower side}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

このとき V_{Th} は誤差関数の変数としての閾値電圧である。ここでも (a) で定義した σ と μ が出てくるが、2 つの誤差関数の中心値 (μ_{sig} が入力信号の波高値、 μ_{ofs} がオフセット電圧の位置に対応) とその標準偏差に対応している。 σ が 0 の極限でこの傾斜は垂直となり、その位置が μ となって波高値そのものとなる。2 つの誤差関数の中心値の差 $\mu_{sig} - \mu_{ofs}$ が増幅器出力信号の波高値に相当する。

図 4.18(c) は HAPD を接続し 1 光子相当の光を入射させた時の信号入力時の Threshold scan である。HAPD の光子検出は Poisson 分布に従う確率現象であること、光電子検出以外でも暗電流によるノイズが SA03 に入力されることを反映してこのような分布となる。分布の一番高いピークはペDESTAL である。また、その上にある広い階段状分布が 1 光子信号に相当し、(b) と同様に解析をして $\mu_1 - \mu_0$ が 1 光子信号によるアナログ信号波高値となる。1 光子信号より高い領域に分布しているのは、1 光子信号にのっているノイズによるものと 2 光子信号が検出されることもあるためである。

実際の測定は 1 つの SA03 で全 36 チャンネルの分布を同時に得ることができる。チャンネル数を横軸に、比較器に設定する V_{th} を縦軸に取った 2 次元ヒット分布を図 4.19(a) に示す。同図 (b) は横軸を比較器に設定する V_{th} を縦軸に取ったヒット分布を表し、同図 (a) の 1 チャンネルをプロジェクションした図である。このようにして Threshold scan からデジタル出力の前のアナログ信号情報を取りだし、量産版 SA03 の性能評価を行う。

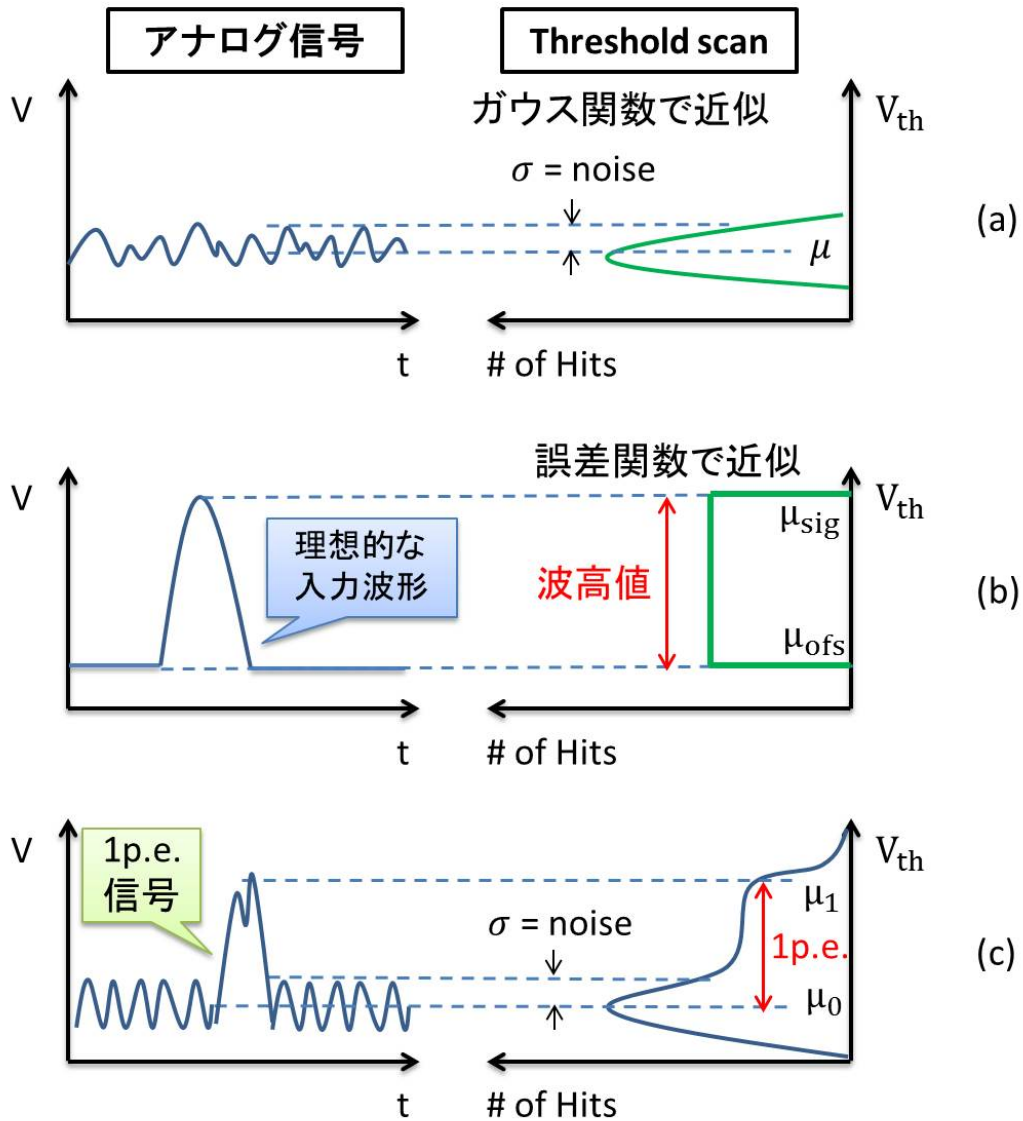


図 4.18: 比較器に入力されるアナログ信号とその際の Threshold scan の結果。(a) がノイズのみを測定した時の結果。(b) が理想的な波形を入力した時に得られる結果。(c) がノイズが混入した実際の入力の結果。HAPD を接続し 1 光子相当を入射させた時の結果はこのようになる。

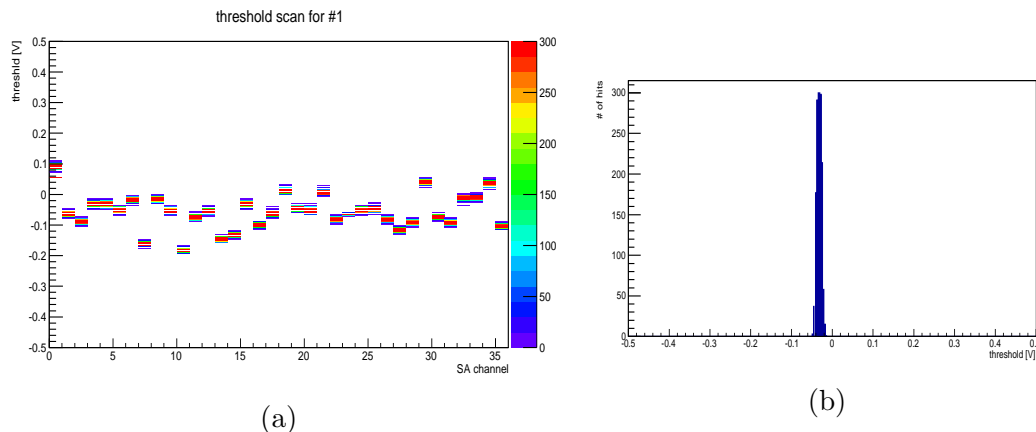


図 4.19: (a)Threshold scan の結果を全 36 チャンネル同時に表した結果。横軸は SA03 チャンネル、縦軸は閾値電圧に対応。(b)1 チャンネルをプロジェクションした結果。横軸は閾値電圧、縦軸はヒット数に対応。(a) の Z 軸方向の色の違いは (b) に示すヒット数に対応する。

4.4.6 検査システムによる性能評価

検査システムでは SA03 に最低限必要な機能として以下の項目の確認を行った。『信号出力の有無』の定義は Threshold scan で出力があるものは有、出力がないものは無である。『オフセット調節機能』、『増幅機能』に関して以降で詳しく記述する。

- 信号の出力の有無
 - Threshold scan のエントリー数で判断
- オフセット調節機能
 - 微調節 16 段階の調節範囲が粗調節 1 段階分の範囲をカバーできている
- 増幅機能
 - 1 光子相当の電荷量 (8 fC) 以下で線形性が保たれている

オフセット調節機能

オフセットを適切に調節できるかについての検査では、まず検査ボードの設定電圧はデジタル電源を 3.3 V、アナログ電源を ± 1.65 V に設定した。測定方法は バイアス電圧印加時の HAPD 検出器容量である 80 pF を SA03 に接続し、オフセットを 1 段階ずつ変更し、Threshold scan を行い微調節・粗調節各 16 段階のオフセットレベルを算出した。図 4.20 に微調節・粗調節のオフセットレベルの結果を示す。また、図 4.21 に SA03 を検査ボードに装着したときに、実際に SA03 に流れる電流値とオフセット調節可能な範囲の関係を示す。図 4.21 の結果からオフセットレベルの最大と最少の差、すなわちオフセット調節可能な範囲が SA03 に流れる電流値に依存して変わることがわかった。電流値はサブボード内

の可変抵抗の値を調節することで変更が可能である。粗調節は4ビット DAC で16段階であるためである。図4.21の結果から、SA03に流れる電流が低いほどオフセットのダイナミックレンジが小さくなる。DACの刻みの数は固定なので細かく調節が可能であることがわかる。一方、電流が大きい時はダイナミックレンジが大きくなるが各段階のギャップは粗くなる。今後、検査システムではSA03に流す電流値を、実際にフロントエンドボードにSA03を装着した時に流れると予想される $100\mu\text{A}$ に設定し、測定を行った。また、電流値 $100\mu\text{A}$ に設定するに伴いアナログ電源の値を $\pm 1.65\text{V}$ から $\pm 1.95\text{V}$ に変更した。

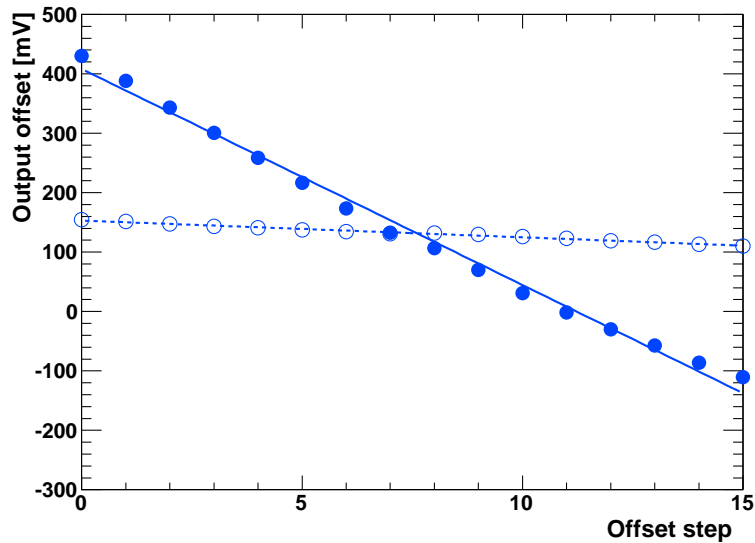


図 4.20: オフセット調節結果。実線が粗調節、点線が微調節を表す。

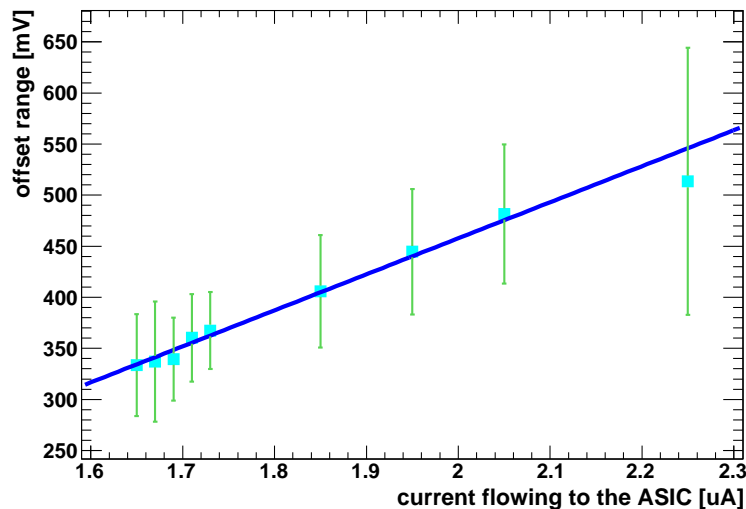


図 4.21: SA03の電源電流値とオフセット調節可動範囲の相関。用いた誤差は6個のSA03計216チャンネルのオフセット調節可能な範囲の統計を取った時に得られるRMSの値であり、青線は1次関数でのフィット結果である。

オフセット調節機能に関する選別条件を式 4.4 のように定義する。

$$\text{微調節のスロープの値} \times 16 > \text{粗調節のスロープの値} \quad (4.4)$$

増幅機能

SA シリーズの増幅器は電荷有感型であるため、入力電荷量と出力波高値がわかれば、その関係から増幅率を求めることができる。SA03 の内部には図 4.22 の様に 0.1 pF の容量が設置されており、テストパルスからの入力信号を容量に通すことで入力波高値を電荷量に換算できる回路になっている。検査システムにおける増幅率測定ではテストパルスの入力を 0 mV(入力なし) から 200 mV まで 40 mV 刻みで変化させながら Threshold scan を行い出力波高値を求め、入力電荷量と波高値の関係 $Q = CV$ から増幅率を算出した。

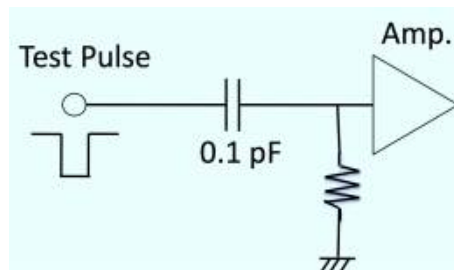


図 4.22: SA03 内部回路

1 チャンネルでの増幅率の結果を図 4.23 に示す。増幅機能で重要なのは 1 光子信号に相当する 8 fC 以下の領域で線形性が保たれることである。1 光子信号相当の電荷量 8 fC は HAPD の典型的な総増幅率 5,000 e^- と素電荷の値から算出する。図 4.23 に線形性が保たれている個体での測定結果を示す。一方、図 4.24(a) に線形性が壊れていた個体での測定結果を示す。このサンプルでは 8 fC 以下での線形性が取れていない。この現象が起こる原因としては図 4.24(b) に示すように信号が発振する場合に起る。このような現象を起こすサンプルは全 36 チャンネル全てで発振を起こすことも確認された。図 4.25(a) に線形性が確認できた SA03 1 サンプルの各チャンネル (横軸) での各増幅率 (縦軸) 分布、図 4.25(b) に線形性が壊れていたとした各チャンネルでの各増幅率分布を示す。全 2520 個の量産版 SA03 の中で、4 個図 4.25(b) の症状が見つかった。

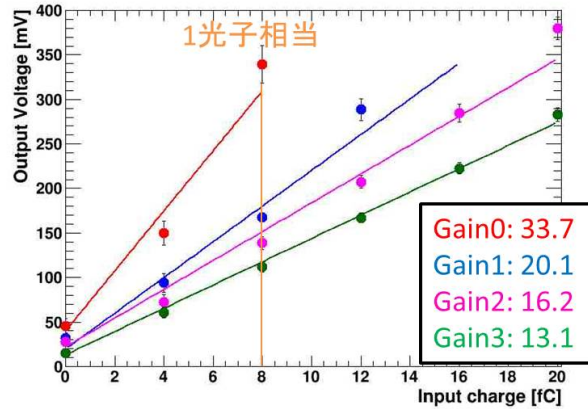


図 4.23: 1 チャンネルでの 4 段階の増幅率の結果。用いた誤差は Threshold scan の上流側と下流側を式 4.3 でフィッティングしたときのそれぞれの σ の差をとったものである。 σ の差は波高値のふらつきを表している。

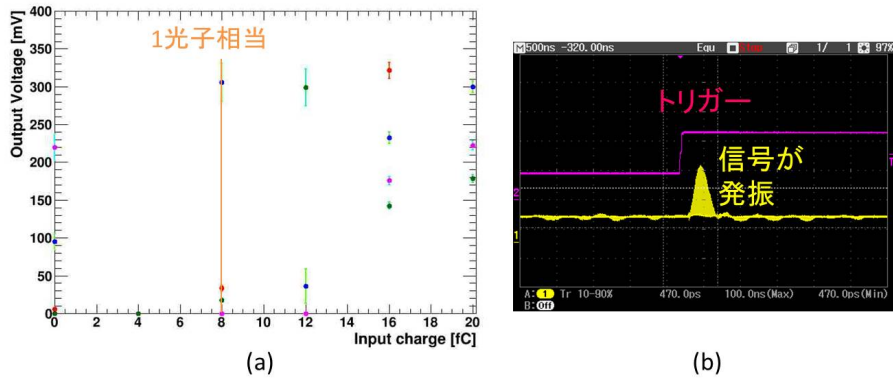


図 4.24: 増幅機能不良品の例 (a)。1 光子信号以下で線形性がないサンプルは信号が発振している (b)。

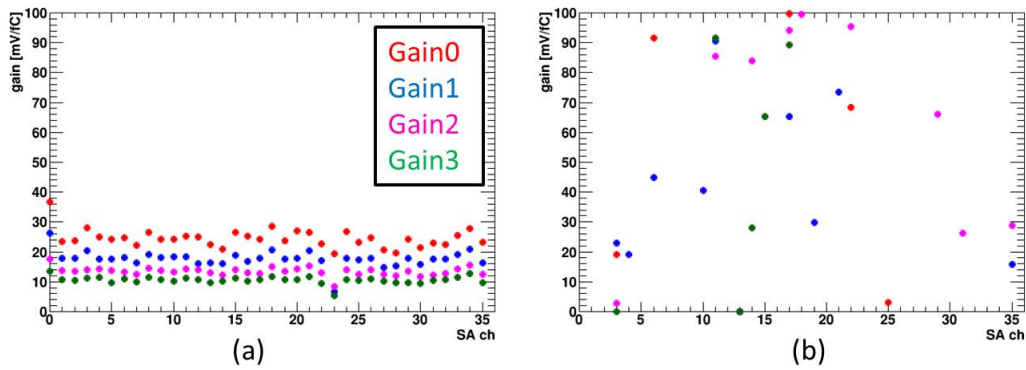


図 4.25: SA03 1 サンプルの各チャンネルの各増幅率分布 (a) 良品 (b) 不良品

検査システムでオフセット調節機能・増幅機能を調査するにあたり、SA03 1個で微調節・粗調節各 16 段階のオフセットレベルの値、微調節・粗調節のスロープの値、そして増幅率の値を得ることができる。これらの値は、実際の Belle II 実験でも使用できるようテキストベースでデータベース化した。データベースに関する詳細は付録で述べる。

4.4.7 接続不良によるパラメータダウンロードの失敗

SA03 の背面の BGA タイプの配線をサブボードがピンで挟み込んで信号読み出しを行っているので、接触が悪い場合はパラメータのダウンロードができない。2度サブボードに付け直してもパラメータダウンロードができないサンプルが 79 個あった。

4.4.8 測定結果まとめ

検査システムで測定したオフセット調節機能、増幅機能の結果を表 4.4 に示す。A-RICH では数チャンネル不良を持つ SA03 も使用するという方針であったが、検査システムの評価結果によると全チャンネル良品が 2081 個と全体の 83 % となり、実機で使用する 1680 個を全チャンネル良品を選定できることがわかった。

表 4.4: 検査システム結果

	SA03 の数 [個]	
良品	全チャンネル良品	2081
	1つ不良チャンネルを含む	284
	2つ不良チャンネルを含む	47
	3つ以上不良チャンネルを含む	13
接続不良		79
全チャンネル不良		12
合計		2520

4.5 SA03 の選定

本節では、検査システムで測定した増幅率 (4 段階)、オフセット調節機能 (粗・微調節各 16 段階) の値を用い、実機に使用する個体の選別方法と結果について述べる。

4.5.1 評価方法

表 4.5 に判定に必要な項目を示す。

表 4.5: 定量的評価に使用した項目

項目	内容等	値 [単位]
HAPD 総増幅率	HV 印加時の量産版 HAPD 30 個の平均	9.28 fC
ノイズ量	放射線照射後 HAPD + SA03 のノイズ量	1.28 fC
SA03 増幅率	SA03 のチャンネル毎の増幅率 (3 段階)	G [mV/fC]
オフセット	SA03 のチャンネル毎のオフセット (粗 16 段階)	V_{offset} [mV]

『HAPD の総増幅率』は KEK で行われている量産版 HAPD 30 個の測定値の平均を用いた。測定方法に関しては 5 章で詳しく述べる。『ノイズ量』は Belle II 実験 10 年分に相当する放射線量を照射した HAPD に ASIC を搭載した時に期待されるノイズ量である [17]。『SA03 増幅率』、『オフセット』は検査システムにより得られた測定値を用いる。増幅率は不定性の大きい最大の増幅率 (=Gain0) は今回は使用せず、残りの 3 段階 (=Gain1,2,3) を用いる。オフセットは粗調節で調節可能な 16 ステップのオフセットレベルを用いることとした。評価基準と評価方法を以下に示す。また、評価方法の概念図を図 4.26 に示す。

1. 1 光子信号の波高値が閾値電圧以上になるようにオフセットの調節が可能。
 - i チャンネル毎の 1 光子信号の波高値⁶を求める。
 - ii オフセットを変えていき (粗 16 段階)、1 光子信号の波高値が閾値電圧を超えるオフセットレベルを探す。
 - iii 閾値を変え、i、ii を調べる。
2. オフセットからノイズ標準偏差の 2 倍以上の位置に閾値電圧を設定可能。

1-iii における閾値電圧のスキャン領域は図 4.27 に示す。同図は良品 2081 個の SA03 のオフセットレベル (粗) の度数分布である。最頻値である青いラインより高い領域に閾値電圧を設定したときに最も条件を満たすサンプル数が得られるので、主にこの領域でスキャンを行った。次に閾値電圧の設定方法 (図 4.26(c)) の解説を行う。閾値を決める方法として、まずはチャンネル毎でノイズの波高値⁷を求める。そのノイズ波高値を 1σ と定義する。そして、評価を行うオフセットレベルから σ の 2 倍以上の位置に閾値電圧を設定することができるかどうか評価した。今回は 2 倍 (2σ)、3 倍 (3σ) の位置に閾値電圧を設定することにした。また今回の評価では良品 2081 個の全ての SA03 で閾値電圧を共通にした場合を仮定する。実機のフロントエンドボードは 4 チップずつ ASIC が搭載されるため実際は 4 つずつで共通になれば良いが、本評価では厳しい条件での判定になる。

以上の条件で評価を行うことにより、A-RICH での各チャンネルの性能は以下のようになる。

- 閾値をオフセットから 2σ の位置に設定した時はノイズの 95.45% を排除でき、 3σ の位置に設定した時はノイズの 99.73% を排除できる。

⁶1 光子信号の波高値は表 4.5 の『HAPD の総増幅率』の値と素電荷の値の積からノイズ量を求め、そのノイズ量と表 4.5 の『SA03 増幅率』の積から算出する。

⁷ノイズ波高値は表 4.5 で定義した『ノイズ量』と『SA03 増幅率』と素電荷の値から算出する。

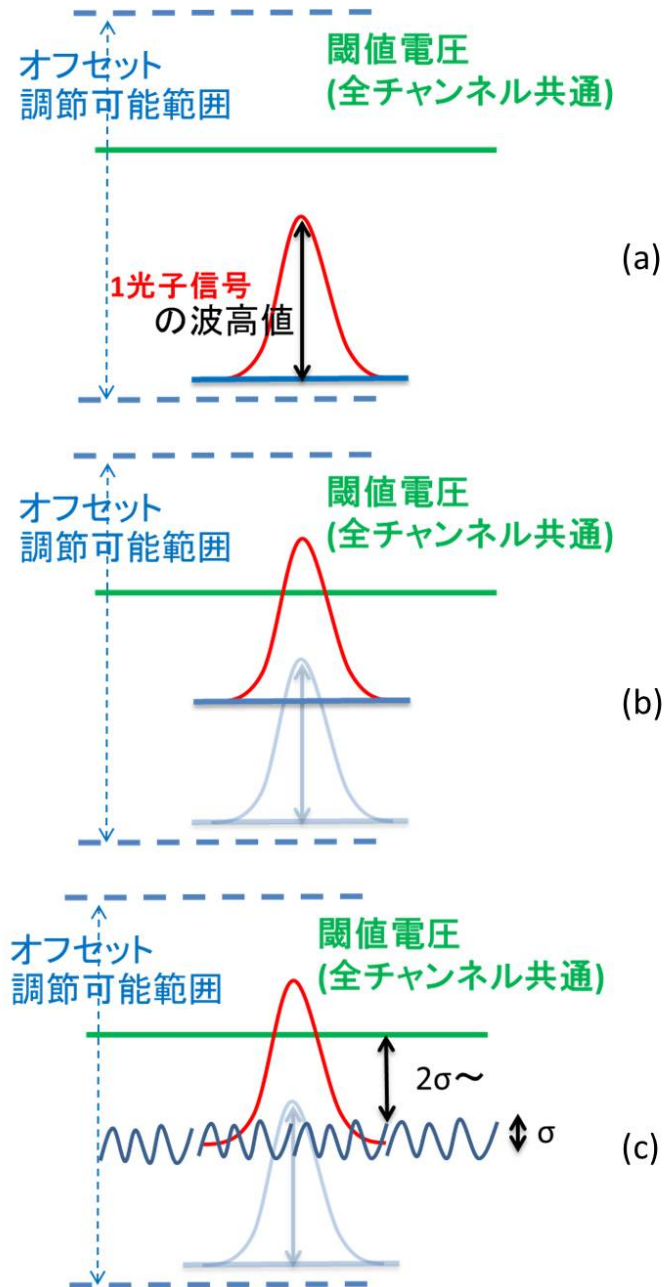


図 4.26: 評価方法概念図

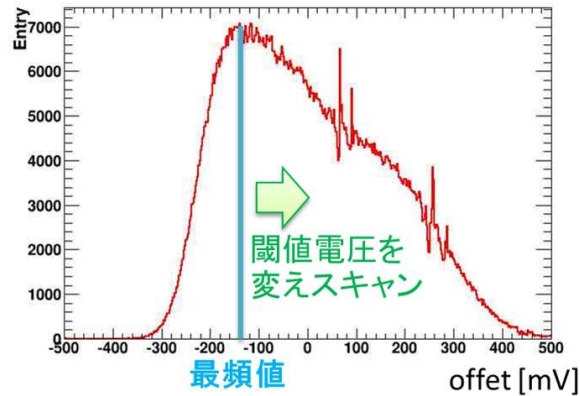


図 4.27: 良品 2081 個の粗調節によるオフセットレベルの度数分布

4.5.2 評価結果

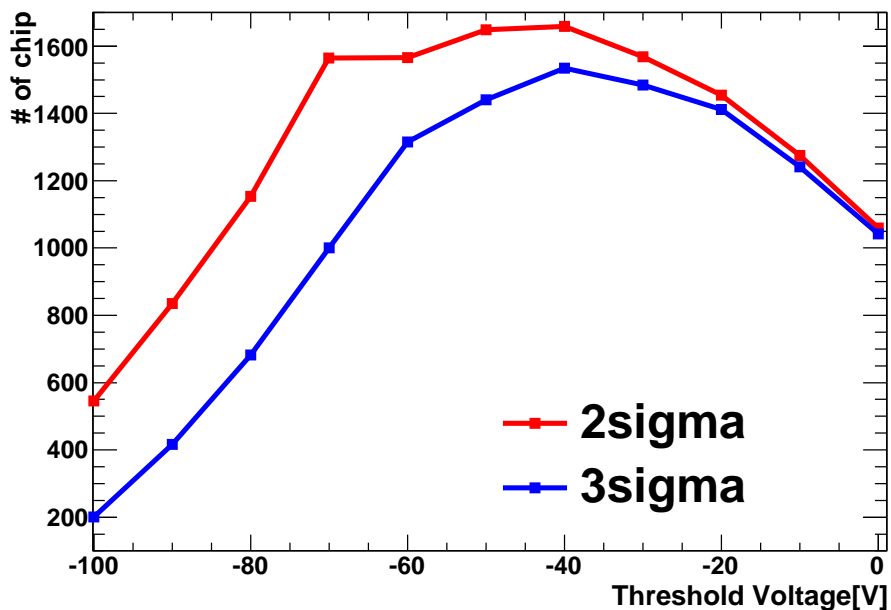


図 4.28: 判定結果。閾値電圧毎の全 36 チャンネルで条件を満たす SA03 の数の推移。

図 4.28 に閾値電圧をオフセットから 2σ 、 3σ 離れるように設定した場合の全 36 チャンネルで条件を満たす SA03 の数と設定閾値電圧の相関を示す閾値をオフセットから 2σ の位置に設定した時は閾値電圧を -40 mV に設定すれば 1639 個の全チャンネルで条件を満たす SA03 が得られることがわかる。また、閾値をオフセットから 3σ の位置に設定した時も閾値電圧を -40 mV に設定すれば 1514 個の全チャンネルで条件を満たす SA03 が得られる。最終的に実機で使用する 1680 個の良品の選定を行うため、1 回目の判定で条件を満たした SA03 を良品 2081 個から引いた数 (2σ では $2081-1639=442$ 個、 3σ では $2081-1514=567$

個) に対して V_{th} を別の値にして同様の判定を行い、必要数である 1680 個を得られるまで繰り返した。判定 2 回目の結果を図 4.29 に示す。そして、最終結果を表 4.6 に示す。

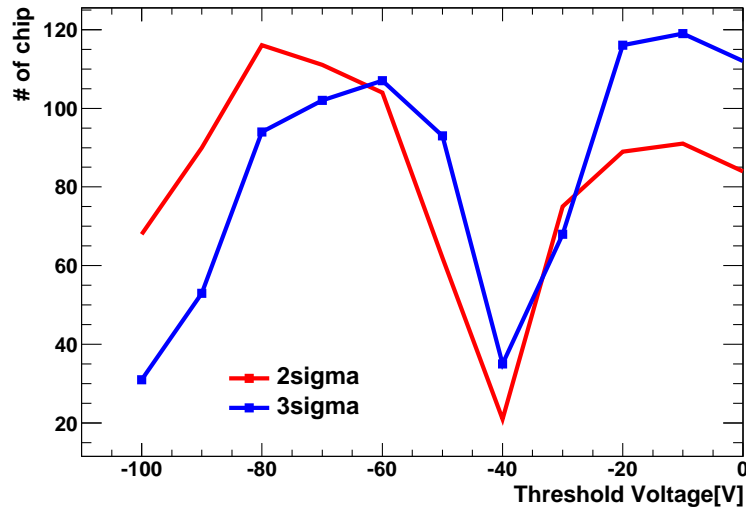


図 4.29: 判定 2 回目の結果

表 4.6: 選定結果

オフセットから 閾値電圧まで距離	設定閾値電圧	全 ch で条件を 満たす SA03 の数	合計
2σ	-40 mV	1639 個	1755 個
	-80 mV	116 個	
3σ	-40 mV	1514 個	1738 個
	-10 mV	119 個	
	-70 mV	105 個	
4σ	-30 mV	1325 個	1411 個
	-70 mV	86 個	

オフセットからノイズ波高値の 2 倍または 3 倍の位置に閾値電圧を設定した場合、閾値電圧毎に SA03 をそれぞれ 2 つと 3 つのグループに分けることで、実機で全チャンネル良品を選定できることがわかった。また、よりノイズと 1 光子信号を分離することができる 4σ での解析も行ったが、実機での全チャンネル良品の選定は困難と思われる。

本研究の解析結果から、オフセットからノイズ波高値の 3 倍以上の位置に閾値電圧を設定した場合において、ノイズと波高値を十分に分離することができ、かつ全数でその条件を満たす ASIC を選定できることがわかった。実機でもオフセットからノイズ波高値の 3 倍以上の位置に閾値電圧を設定することが望まれる。

5 HAPD の量産と性能評価

A-RICH 検出器で使用される光検出器は、単光子識別性能、磁場中での動作、放射線耐性などを考慮し、144 チャンネル マルチアノード型 HAPD を浜松ホトニクス (HPK) と共同で開発してきた。A-RICH では 420 個の HAPD が必要であり、量産は 2013 年 9 月から開始した。生産された HAPD は KEK で性能評価試験を行い、実機で使用する良品の選定を行う必要がある。

本章では HAPD の生産の状況と性能試験の結果について述べる。

5.1 HAPD の生産状況

HAPD の仕様は 2012 年に決定し、2013 に量産が開始された。HAPD の生産は HPK で行われ、2013 年 9 月に初めて量産版 HAPD が KEK に届き性能評価試験を開始した。HAPD の生産は、実機で使用する 420 個と予備の 30 個、合わせて 450 個が生産される。2014 年 12 月までに 365 個の HAPD の生産が完了した。表 5.1 に KEK に届いた月ごとの HAPD の数を示す。カッコ内の数字は KEK での測定結果で明らかに性能に問題があるサンプルを HPK に送り返し、新たに届いたサンプルの数である。2015 年に交換分を含め残りの 73 個が届くことになっており、予定では 2015 年 9 月に全生産が終了する。

表 5.1: 量産版 HAPD の到着数

2013	HAPD の数	2014	HAPD の数
		Apr	15 (+1)
		May	15
		Jun	10 (+1)
		Jul	27 (+4)
		Aug	27
Sep	24	Sep	31
Oct	24	Oct	14
Nov	44	Nov	1
Dec	34	Dec	11 (+2)
Jan	10	Jan	
Feb	30	Feb	
Mar	40	Mar	

5.2 量産版 HAPD の性能評価

生産された HAPD の性能評価は HPK でも行われ、HAPD に流れるリーク電流・波高分布・増幅率が測定される。KEK では HPK の再現実験やに加え独自の性能評価試験を行い、実機で使用する仕様に耐えうるか検査を行った。KEK では実機で使用する SA シリーズを用いたヒット分布をもとに HAPD 全チャンネルの検査を行った。

以下に KEK で行った量産版 HAPD の評価項目を示す。KEK での測定項目は一部 HPK でも測定が行われている。HPK で測定されている HAPD の電気的特性を表 5.2 に示す。同表に示す不良チャンネルとは、APD リーク電流が $1\mu\text{A}$ を超えるチャンネル、また Avalanche 増幅値が許容値を下回っているチャンネルを意味している。本研究では、以下の測定結果から不良チャンネルの抽出、また良品 HAPD の決定を行った。また、KEK では測定・評価後の HAPD は合格品、B ランク、不合格に分類を行い、実機使用の HAPD 選定に向け性能のクラス分けを行った。合格品とは KEK で独自に行った測定結果が表 5.2 に示す電気的特性を満たす HAPD である。実機使用品は主に合格品から選定する。B ランクとは HAPD の電気的特性 (表 5.2) を満たさない HAPD であるが、用途を工夫⁸することで実機でも使用可能な HAPD である。不合格は HAPD の電気的特性を満たさないチャンネルが多数あり、実機での使用が困難な HAPD である。

1. チップ毎のリーク電流測定
 - HPK でも測定。HPK 結果との比較ができる。
2. チャンネル毎のリーク電流測定
 - HPK では全チャンネル検査。KEK では HPK で問題の見つかったチャンネルまたはほかの測定項目で異常が見つかったチャンネルのみ測定。
3. ノイズ測定
 - SA シリーズを用い全チャンネルの Bias 電圧毎でのノイズ量を測定。
4. 2次元測定
 - SA シリーズを用いレーザー位置におけるヒット分布を測定。
5. 総増幅率測定
 - SA シリーズを用い5チャンネルのみ Threshold scan。結果から総増幅率を算出。
6. 量子効率測定

表 5.2: HAPD の電気的特性

項目	標準	最小	最大	単位
光電面量子効率	28	24	-	%
APD バイアス電圧	250~500	-	-	V
ガード電極電圧	125~250	-	-	V
APD リーク電流	-	-	1	μA
Avalanche 増幅	-	30	-	-
不良チャンネル	-	-	10	個
電子打ち込み増幅	1800	1500	-	-
総増幅率	-	45000	-	-

⁸不良チャンネルを読み出しエレキの不良チャンネルと組み合わせる等の方法

5.2.1 電流測定

KEK に届いた量産版 HAPD はまずチップ毎のリーク電流値を測定する。測定のセットアップを図 5.1 に示す。チップ毎のリーク電流の測定では、各 HAPD で 4 チップずつ測定を行っている。ガード電圧は 175 V で固定し、バイアス電圧を変えていき、その時に流れるチップ毎の電流を測定している。設定するバイアス電圧のリミットは HPK から送られるデータを使用した。電流測定は HPK でも同様の測定を行っており、チップに $10 \mu\text{A}$ 流れた時の電圧値をブレイクダウン電圧 (V_b) とし、 $V_b - 10 \text{ V}$ の逆バイアス電圧を最大逆バイアス電圧とした。得られた測定結果を HPK 結果と比べ、再現性の確認や HPK の測定結果にはないリーク電流が大きなサ個体を確認する。検査した HAPD のうち、11%(27/265) の個体から $1 \mu\text{A}$ 以上のリーク電流が観測された。

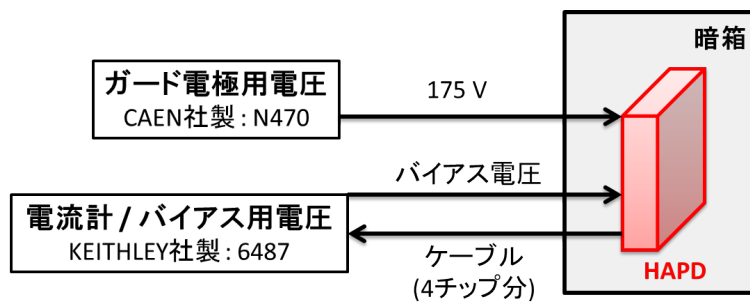
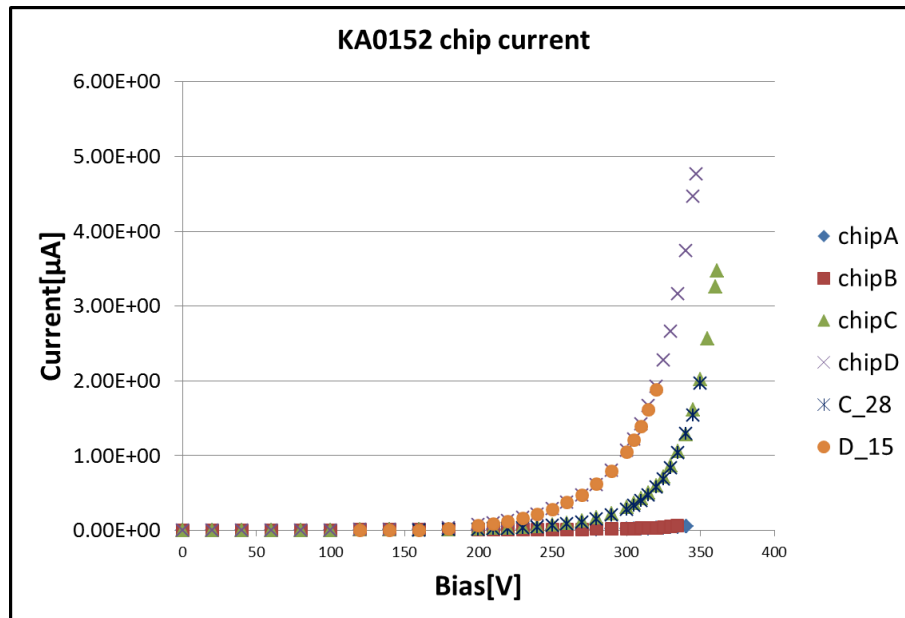


図 5.1: チップ電流測定セットアップの概観図

図 5.2: HAPD1 台の電流測定結果。チップ C、D でリーク電流値が $1 \mu\text{A}$ 以上。サンプル番号 KA0152。

チップのリーク電流が $1 \mu\text{A}$ 以上流れる場合の対応を解説する。まずは HPK から送られたデータのチャンネル毎の電流値を確認し、リーク電流が大きなチャンネルを探す。また、後述するノイズ測定からノイズ量の多いチャンネルを抽出し、HPK のチャンネル電流値のデータと合わせて、不良チャンネルの候補を挙げる。候補が上がったら次にチャンネル電流測定を行う。KEK で行うチャンネル電流測定は不良チャンネル候補に対してのみである。図 5.3 に示す。

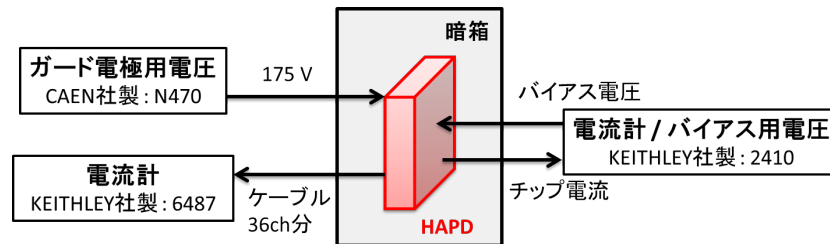


図 5.3: チャンネル電流測定セットアップ概念図。1 チップ 36ch 分のケーブルから測定したいチャンネルを電流計 (6487) に繋ぐ。使用しないチャンネルは 50Ω で短絡する。

不良チャンネルが特定できた個体に関しては対応するピンのカットを行った。不良チャンネルのピンカットにより、チップ電流のリーク電流が $1 \mu\text{A}$ 以下に下がる個体がほとんどであるが、一部でピンをカットしても隣のチャンネルに電流が流れ込み、リーク電流が $1 \mu\text{A}$ 以下に下がらない個体が見られた。このようなサンプルは”電流流れ込みサンプル”と呼ぶ。ピンカット後でもリーク電流が収まらない個体に関しては、実機での長期間の使用中に電流値がさらに多くなる恐れがあるため、現在は許容範囲内であっても今後の経過を確認し不合格と判定する必要がある。

次に長時間の経過により HAPD のリーク電流値に違いが起るか確認を行った。2013 年 3 月までに約 200 個の HAPD が KEK に届いた。これらのサンプルは先に述べたように到着後まずチップ電流を測定し、リーク電流が大きい場合は不良チャンネルに対応するピンの切除を行った。そして、6ヶ月後改めてチップ電流の再測定を行った。セットアップは 1 回目と同様 (図 5.1) である。1 回目の 2 回目での最大リーク電流値の比較の結果を図 5.4 に示す。測定サンプルには前述した流れ込みサンプルも含まれるためもともと $1 \mu\text{A}$ 以上流れているものも多くみられるが、特に問題なのが 1 回目の測定では $1 \mu\text{A}$ 以下だったが 2 回目の測定ではリーク電流が増大した見られたことである。このようなサンプルは測定した 178 個中 2 個見つかった。このうち 1 つを HPK に送り返し調査したところ、図 5.5 に示すようにリーク電流が増加した APD 表面に非常に小さな物質が付着していることや、数 μm のクラックがあることが分かった。これらが製作時、もしくは KEK に到着後に付着・起こったのかは現在調査が進められている。

電流測定結果の内訳を表 5.3 に示す。電流測定による B ランク (電流流れ込み) は電流流れ込みサンプルであり、22 個の HAPD がこれに該当した。不合格 (電流大) は表 5.2 に示す許容値をはるかに超えるサンプルで、5 個の HAPD が該当した。不合格 (電流増) は KEK 到着直後と 6 か月後の測定において電流値が許容値を超え増大したサンプルを意味し、3 個の HAPD がこれに該当した。時間経過によりリーク電流が増加する個体があることが分かったため、A-RICH インストール直前に改めて全 HAPD の電流測定を行う必要

がある。

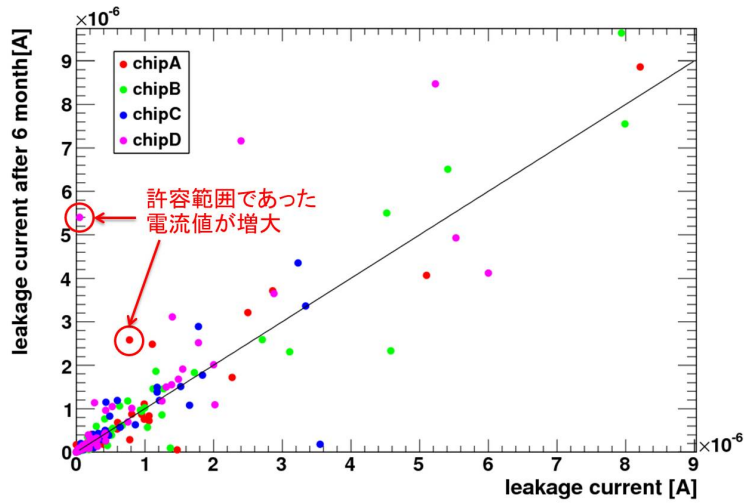


図 5.4: KEK 到着直後と 6 か月後でのチップ電流値の比較。横軸が到着直後 (1 回目)、縦軸が 6 ヶ月経過後 (2 回目) の結果。



図 5.5: 電子顕微鏡で確認されたリーク電流増加サンプルの APD 表面。赤丸に示すように表面に物質が付着している様子がわかる。

表 5.3: 電流測定結果の内訳

KEK 結果	個数
合格	235
B ランク (電流流れ込み)	22
不合格 (電流大)	5
不合格 (電流増)	3
電流測定で判定済み合計	265

5.2.2 ノイズ測定

各 HAPD の全 144 チャンネルを対象とした SA シリーズを用いたノイズ測定が行った。ノイズ測定のセットアップの概念図を図 5.6 に示す。測定方法はバイアス電圧を 0 V から

V_b –10 V まで変えていき、各バイアス電圧で Threshold scan を行う。ノイズ量はエレクトロン数で評価しており、Threshold scan で得られたノイズ波高値と読み出し ASIC の増幅率 (既知) と素電荷の値から算出することができる。ノイズ測定結果の例を図 5.7 に示す。測定したのは図 5.2 と同じサンプルである。ノイズ測定で特定できたノイズの大きいチャンネルはチップ C の ch9、ch28、チップ D の ch15 であった。チップ C の ch9 は HPK の測定ですでに判明していた不良チャンネルであったが、残りの 2 つは本測定で新たに特定された不良チャンネルである。これらの不良チャンネルが図 5.2 に示すリーク電流大の原因であった。このように、ノイズ測定は不良チャンネルを特定できる。

ノイズ測定結果の内訳を表 5.4 に示す。ノイズ測定での B ランクは本測定でノイズ量が大きいチャンネルが 10 チャンネル以上見つかった HAPD を意味し、5 個の HAPD がこれに該当した。不合格は HAPD が有するチャンネル全体のノイズ量が大きく HPK 結果とも一致しない HAPD であり、4 個の HAPD がこれに該当した。

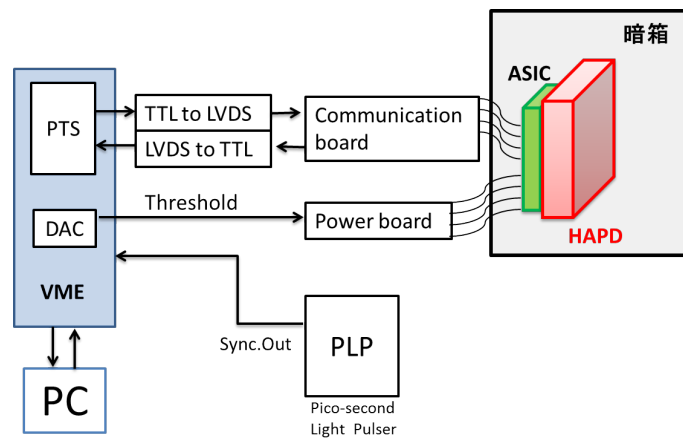


図 5.6: ノイズ測定セットアップの概念図。読み出し ASIC を搭載した読み出ボードからの出力は LVDS¹⁰ なので測定器の基本入力である TTL に変換するモジュールを必要とする。また計算機とのデータ通信には PTS と呼ばれる専用の VME モジュールを使用している。測定システムのトリガーは PLP から与えられる。Threshold は VME モジュール内の DAC で生成する。

¹⁰Low Voltage Differential Signaling: 定電圧差動伝送方式、デジタル信号伝送方式の一種で動作電圧、導通電流が比較的低く消費電力を抑えられるのが特徴である。

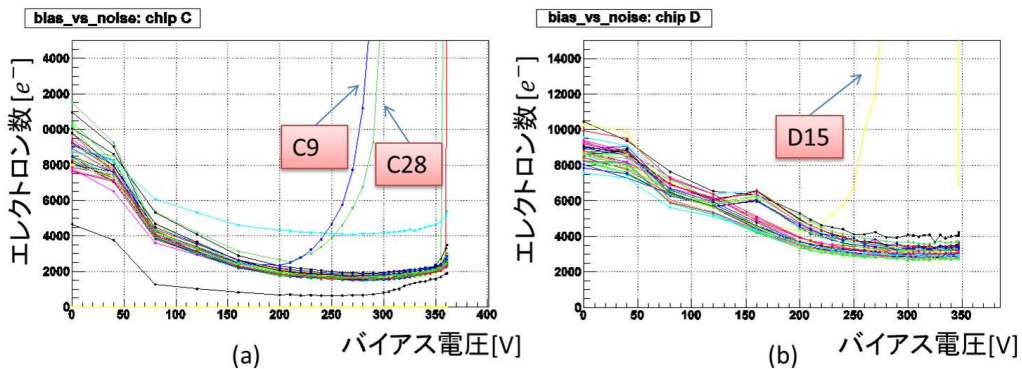


図 5.7: ノイズ測定結果。(a) チップ C 36ch 分のノイズ量、(b) チップ D 36ch 分のノイズ量。色の違いがチャンネルの違いを表している。

表 5.4: ノイズ測定の内訳

KEK 結果	個数
合格	256
B ランク	5
不合格	4
ノイズ測定で判定済み合計	265

5.2.3 2次元ヒット分布

ここで、HAPD の 2次元測定について評価を行う。本測定では HAPD の位置検出応答性能について評価する。セットアップの概念図を図 5.8 に示す。

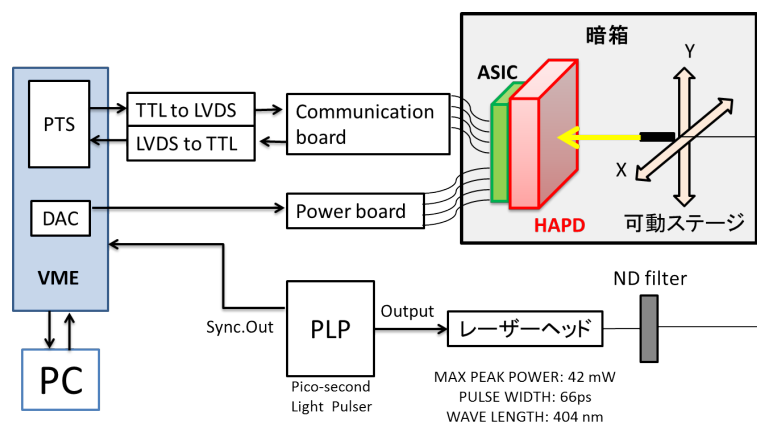


図 5.8: 2次元測定システムの概要

測定対象の HAPD を入れる暗箱内にレーザー光を 2次元的に移動させる可動ステージ

と、信号読み出し ASIC が搭載された読み出しボード¹¹が設置されている。HAPD への電源 (Guard、Bias、HV) 供給制御、可動ステージの制御、データ取得などは全て隣接の PC から行える。表 5.5 に本測定の実験条件を示す。

表 5.5: 2次元測定の実験条件

可動ステージ移動間隔	0.5 mm
測定点	144 × 144
Guard 電圧	175 V
Avalanche gain	40
HV	7000 V

本測定可動ステージの移動間隔は 0.5 mm で 144 × 144 点を測定している。レーザーの位置を動かし、その各点で 1 光子レベルの光を 5,000 回照射させ、得られるヒット分布¹²を測定する。図 5.9 に HAPD の 2次元測定の結果を示す。同図の X 軸、Y 軸はレーザーの照射位置を表しており、位置による色の違いはその位置でのヒットカウントを表す。同図の結果は各測定点のヒットカウントの重ね合わせである。ヒットカウントのないピクセルは HAPD の dead チャンネルか ASIC の dead チャンネルである。4.9 × 4.9 mm² のピクセルも正しく位置検出応答が得られていることがわかる。しかし、側管に近い外側のピクセルで分布に歪みが見られる。これは側管で起きる HV による電場の歪みの影響によるものである。その模式図を図 5.10(a) に示す。

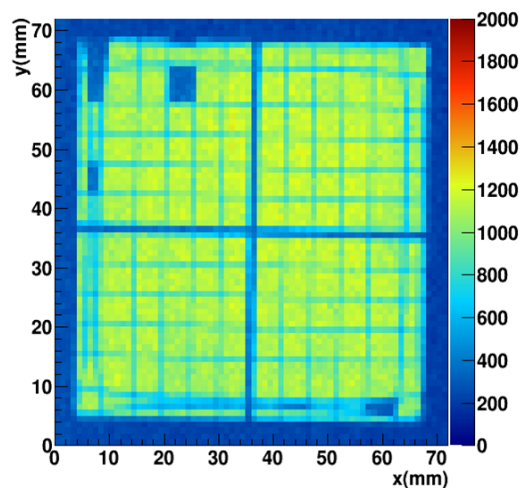


図 5.9: 量産版 HAPD 2次元測定結果。Z 軸方向の色の変化は 1 光子レベルの光が入射した際のヒットカウントに対応する。

¹¹ 2次元測定では使用する読み出しエレキは SA シリーズである。しかし、時期により使用している SA シリーズの version が異なる。信号処理の方法は同じであるため version の違いによる結果の違いはないと思われる。

¹² ヒット分布を得る際の ASIC の Threshold の設定方法について解説する。チャンネル毎のノイズの Threshold scan の結果をガウス関数でフィッティングする。そしてガウス関数の標準偏差と中心値を求める。本測定では中心値から標準偏差の 4 倍の位置に Threshold を設定している。

HAPD は入射窓であるガラスと側管に用いられるセラミックを接合するために金属を挟んでいる。しかし、この構造では光電面に HV を印加した際に金属部分にも同じ高電圧が印加されてしまうことになる。その結果、同図 (a) にあるように側管部分では光電子が HAPD 中心方向に向かって加速され、隣のピクセルに入射することになる。

この問題は Belle II 実験にかけられる磁場内で改善されることが期待される。磁場は電場に対し垂直にかかることになり、その結果、側管付近で曲げられた光電子は磁場に巻き付き、ピクセル方向に垂直に落ちると考えられる。その模式図を図 5.10(b) に示す。HAPD は他検出には見られない磁場内で性能を向上する検出器である。

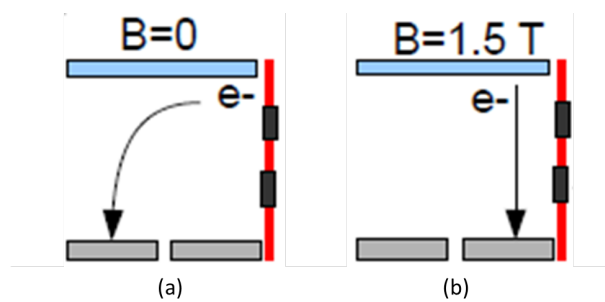


図 5.10: (a) 側管での電場による歪みの影響、(b) 磁場の影響で電場の歪みを改善できる様子

測定した量産版 HAPD の 10 % 程度で、図 5.11(a) に示すように端にノイズの多い領域が現れる問題が発生した。再現性もあり、個体に依存した問題であることを確認した。原因を追究すべくノイズの時間分布を確認した。図 5.12 にノイズの多いサンプルの 1 チャンネルでの HV、Bias 印加後でのノイズヒットカウントの時間経過を示す。レーザーはオフにし、縦軸は 10 秒間のヒット数、横軸は経過時間を示す。この結果から、HV、Bias 印加後、ノイズレートが十分小さくなるまでに数時間を要することが分かった。また、安定するまでの時間に個体差があることも分かった。2 次元測定では図 5.11(a) の黄色い矢印が示すように左側からレーザーを照射しスキャンを行っていたので、ノイズが多い時に測定を行っていたことになる。そのため左側にノイズが多い領域現れてしまったことが分かった。そのため、HV、バイアス印加後ノイズが安定するまで時間を置く対策が取った。しかし、サンプルによって O(10) 分もの安定時間が必要である原因は分かっていない。大半のサンプルで 1 時間以内にノイズが収まる傾向が見られるが、一部大幅に時間がかかるものがある。図 5.11(b) に安定時間 (1 時間) 経過後にノイズが収まる典型的な結果を示す。ノイズが大きい領域は見られなくなった。以上の結果から実機に搭載される際は、十分なノイズ安定時間をとる必要がある。

表 5.6 に 2 次元ヒット分布測定結果の内訳を示す。B ランク (安定性) は HAPD に HV、バイアス印加後ノイズ安定に 1 時間以上かかる個体を意味し、8 個の HAPD がこれに該当した。B ランク (高レート) はヒット数が他の HAPD より多い個体を意味し、1 個の HAPD がこれに該当する結果となった。

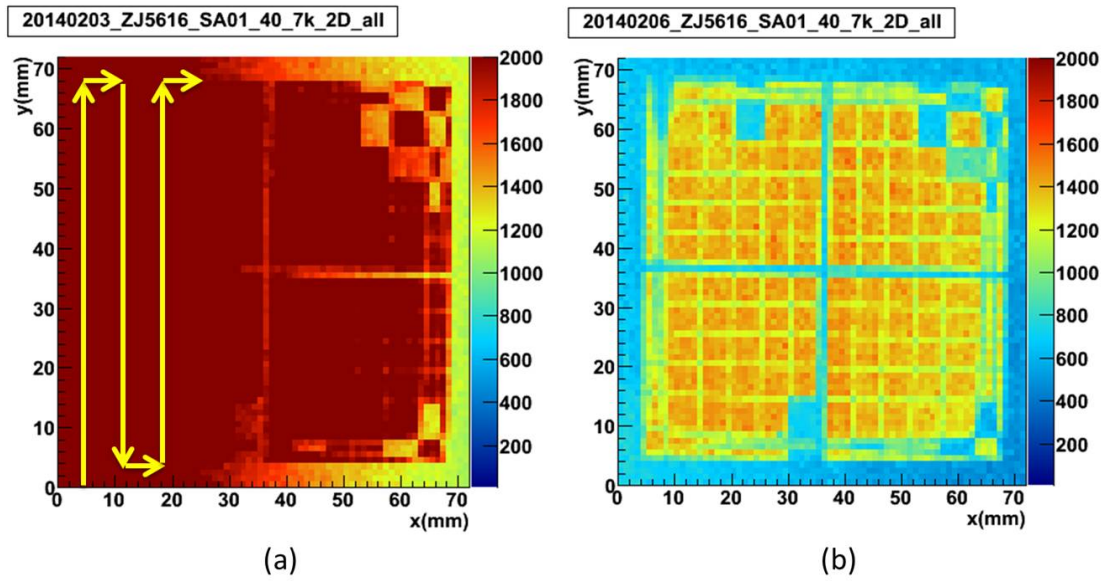


図 5.11: ノイズが大きい領域があるサンプルの例。(a)HV、バイアス印加直後の測定結果。黄色い矢印はレーザーの照射の軌道 (b) 安定時間経過後の測定結果

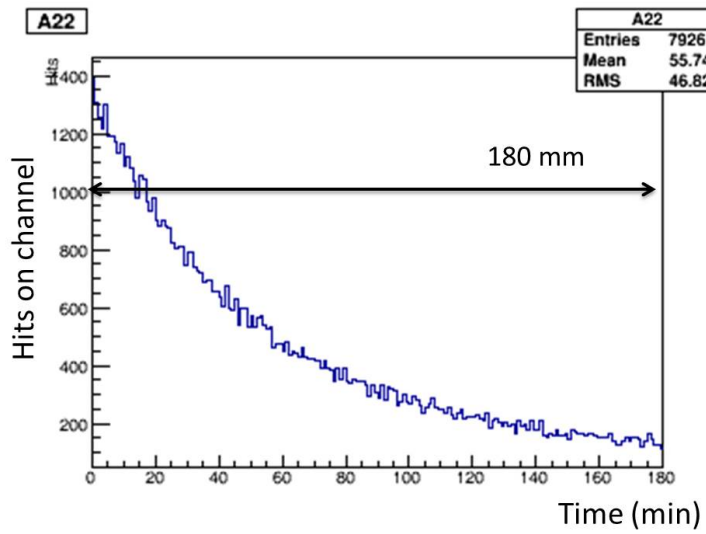


図 5.12: ノイズカウントの時間分布。

表 5.6: 2次元ヒット分布測定の内訳

KEK 結果	個数
合格	256
B ランク (安定性)	8
B ランク (高レート)	1
ノイズ測定で判定済み合計	265

5.2.4 総増幅率測定

HAPD の総増幅率測定について解説する。総増幅率とは打ち込み増幅と Avalanche 増幅の積である。総増幅率測定のセットアップは2次元測定と同じである(図 5.8)。測定したいチャンネルにレーザーを照射し Threshold scan を行う。KEK での総増幅率測定では全チャンネルの測定は行っていない。1HAPD で4つのチップ毎5つのチャンネルのみ計20チャンネルの測定を行う。ここで、総増幅率測定における典型的な Threshold scan 結果を図 5.13 に示す。同図のペDESTAL、1光子、2光子の寄与から総増幅率を算出することができる。用いた式を式 5.1 に示す。(定数) は読み出しエレキの増幅率、 $V_{th(1 \text{ 光子})}$ は1光子相当の波高、 $V_{th(pedestal)}$ はオフセットを表す。式 5.11 光子相当の波高値とエレキの増幅率の積から総増幅率算出した。

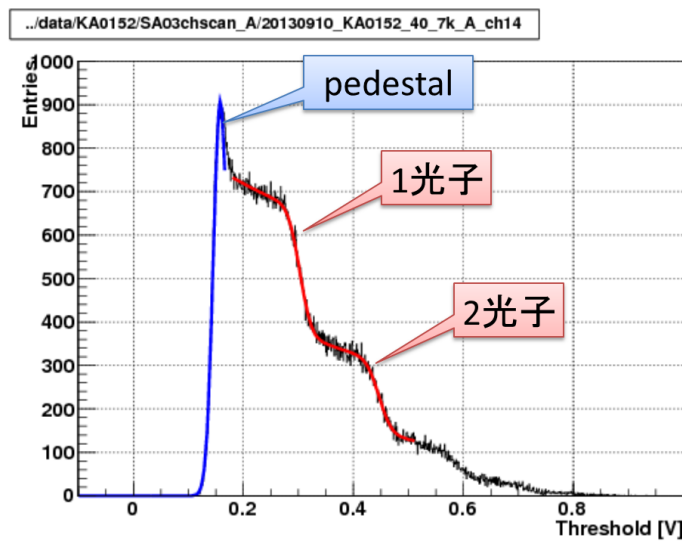


図 5.13: レーザー照射時の Threshold scan 結果。分布の一番高いピークはペDESTALである。また、その上にある広い階段状分布が1光子信号に相当。ペDESTALはガウス関数で、1光子の寄与は誤差関数でフィットしその中心値の差が1光子信号相当の波高値となる。

$$\text{総増幅率} = (\text{定数}) \times (V_{th(1 \text{ 光子})} - V_{th(pedestal)}) \quad (5.1)$$

KEK で測定した量産版 HAPD のチャンネル毎の総増幅率の度数分布を図 5.14 に示す。同図分布の青の部分は表 5.2 に示す総増幅率の要求を満たす結果である。それに対し赤い部分は要求を満たせなかったチャンネルの結果である。要求を満たせなかったサンプルは誤差関数のフィッティングの失敗による影響等、解析結果によるところが多くみられるため、現在は総増幅率の結果を用いた良品 HAPD の選定は行っていない。総増幅率を式 5.1 のように示したが、2光子と1光子の寄与からも総増幅率を積もることができる。

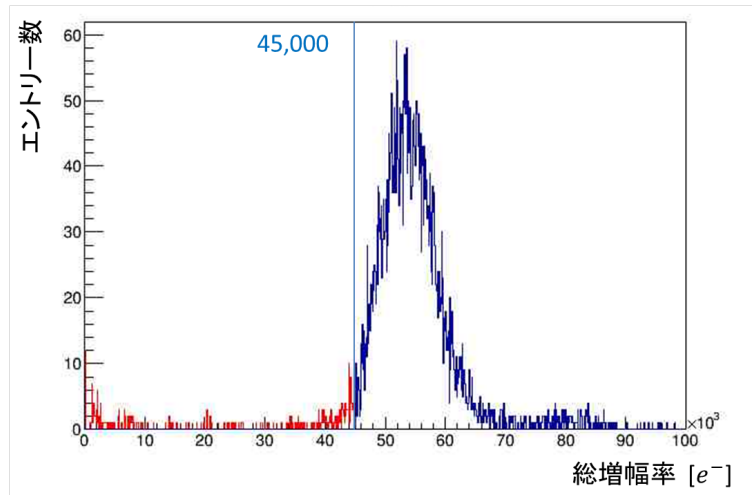


図 5.14: 測定結果による総増幅率の度数分布。青は総増幅率が仕様 (45,000 e^-) も超える領域、赤は仕様を満たさない領域を示す。

$$\text{総増幅率} = (\text{定数}) \times (V_{\text{th}}(2 \text{ 光子}) - V_{\text{th}}(1 \text{ 光子})) \quad (5.2)$$

式 5.1 と式 5.2 の手法による総増幅率の算出結果に違いはないと考えられるが、実際の測定値で評価を行った。結果を図 5.15 に示す。やや式 5.2 を用いた総増幅率結果の方が大きい値となる傾向にあるが、おおまかには一致する結果となった。

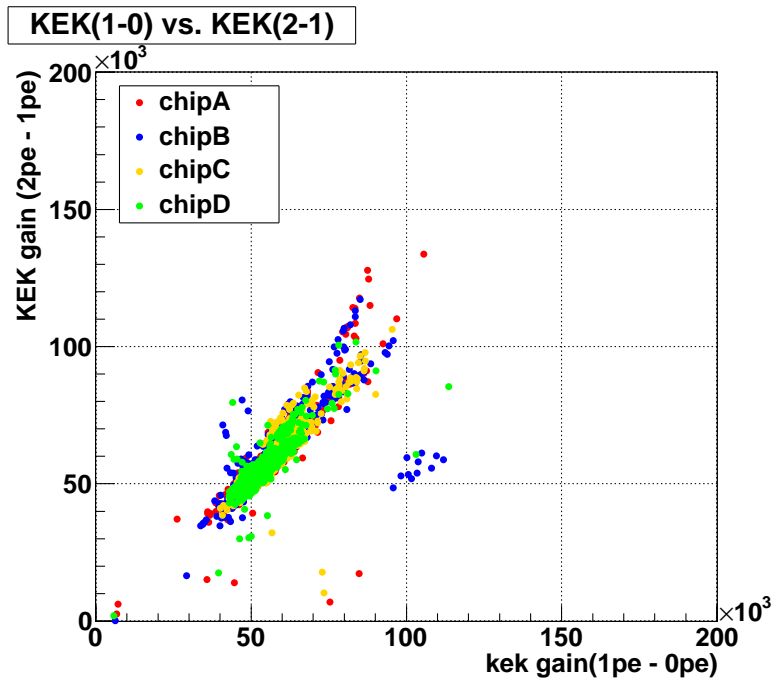


図 5.15: 総増幅率算出方法の違いによる結果の違いの確認。横軸が式 5.1、縦軸が式 5.2 による総増幅率。

HPK の総増幅率結果 KEK で測定した総増幅率結果の比較を図 5.16 に示す。KEK の結果は式 5.1 を用いた。KEK の結果は HPK 結果と大まかに一致した。しかし全体的に低い値となった。要因として読み出し ASIC の増幅率の値を高めに設定している点が挙げられる。ASIC の増幅率は式 5.1、式 5.2 の定数部の分母にかかるため KEK で測定した総増幅率は ASIC 増幅率が高いと小さく算出される。

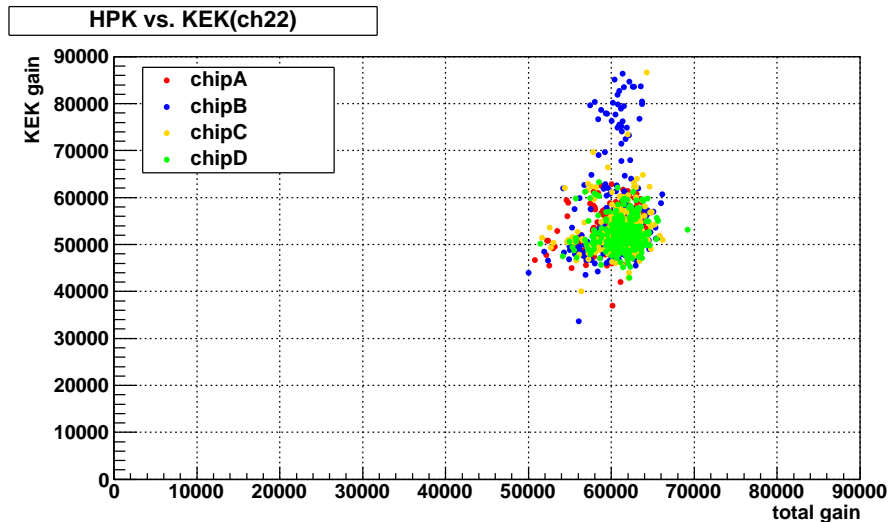


図 5.16: HPK で測定された総増幅率と KEK で測定した総増幅率の比較。横軸は HPK の総増幅率、縦軸は KEK の総増幅率。

5.2.5 QE 測定

光検出器の性能で重要なのが光電面の量子効率 (Quantum efficiency : QE) である。量産版 HAPD は前述したように光電面にスーパーバイアルカリを蒸着させており、QE は平均で 28 % 程度となっている。HPK でも QE の測定は行われているが、KEK でも同様のセットアップを組み、測定結果と HPK 結果を比較した上で合格品の選定を行う。

QE 測定のセットアップを図 5.17 に示す。光源としてゼノンランプ (HPK 製 :L2195) を使用し、特定の波長を取り出すためにモノクロメータを通してしている。取り出す波長 400 nm である。レファレンスとして QE が既知の Photo Diode(PD) を用いる。照射光をピンホールで 1 mm × 1 mm まで絞り、2 mm 間隔で HAPD の有効面積 (64 mm × 64 mm) をスキャンする。1 つの測定点で 50 回光を入射させ QE を測定している。以下に QE の算出方法を示す。図 5.18 のようにミラーを用い、HAPD と PD に同じ光が入射させ、レファレンスの PD の QE と HAPD と PD の光電面に流れる電流値を計算で用いる。ここで ϵ_{PD} は既知の PD の QE 値、 I_{HAPD} 及び I_{PD} はピコアンメータでの測定値である。

$$\epsilon_{HAPD} = \frac{I_{HAPD}}{I_{PD}} \times \epsilon_{PD} \quad (5.3)$$

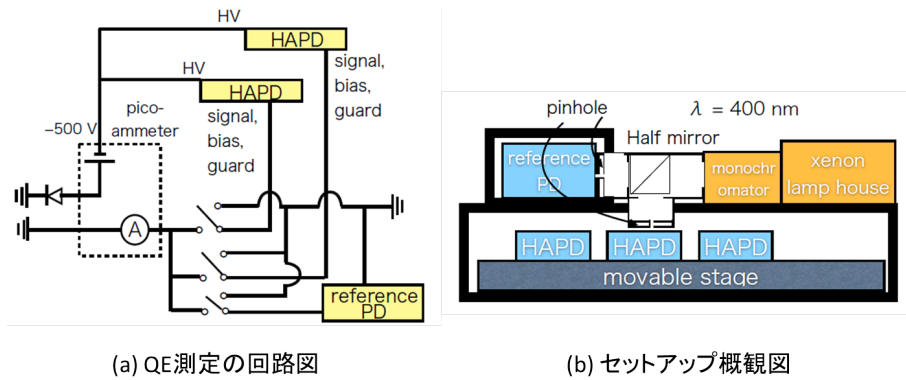


図 5.17: QE 測定の設定アップ

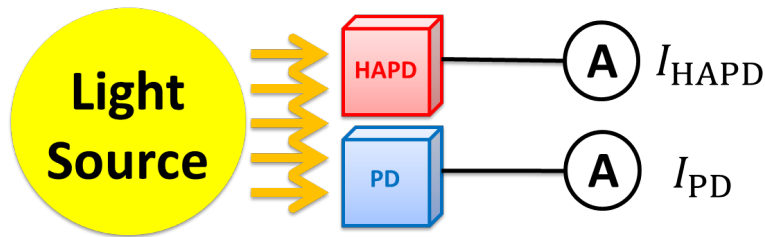


図 5.18: QE 算出方法概念図

典型的な量産版 HAPD の光電面での面一様性の結果を図 5.19 に示す。同図に示すように中心部が QE が高くなっており、外側に行くほど下がる傾向がある。本サンプルでの全スポットの QE 値平均は 32.6 % であり、良品の要求である 24 % 以上を満たしている。また、KPK 結果の 32.8 % とほぼ同値であることから再現性も確認された。しかし、測定した一部のサンプルで図 5.20(a) に示すような、対角線上に QE 値が低くなっているようなサンプルが見つかった。HPK での光電面の一様性の結果 (図 5.20(b)) も同様に QE が低くなる領域が確認された。しかし、このような構造になる原因については今後調査を進める。

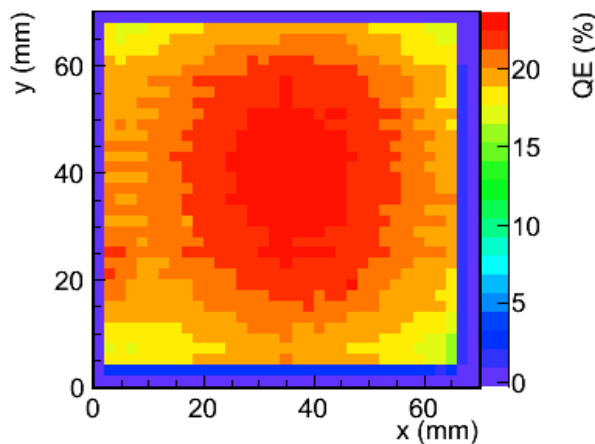


図 5.19: QE 測定結果。

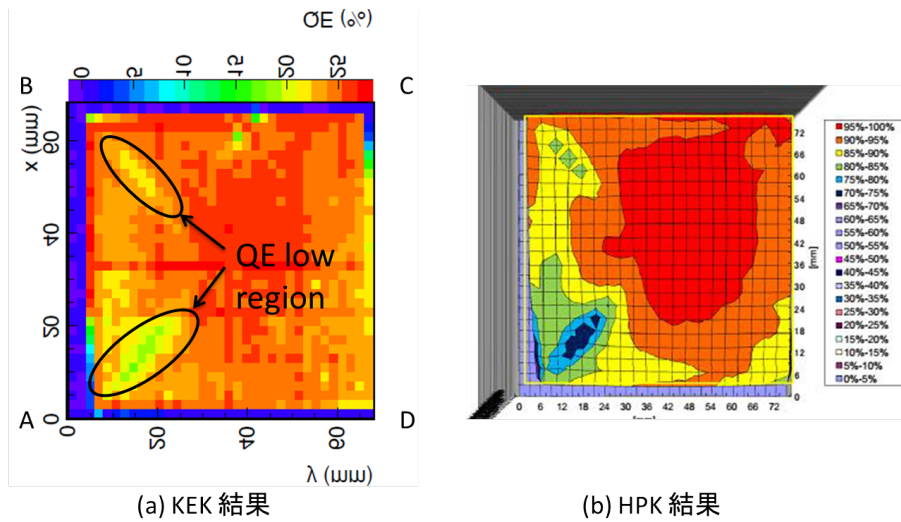


図 5.20: 対角線上に QE が低い領域があるサンプル。サンプル番号 KA0217。(a)KEK 結果、(b)HPK 結果。

図 5.21 に KEK で測定した 277 個の HAPD の平均 QE 値における、KEK 結果と HPK 結果の比較図を示す。同図の各プロットが対角線上にあれば、KEK 結果と HPK 結果が一致することになる。結果は、ほぼ HPK 結果と一致することが分かった。しかし、一部で HPK で QE 値 24 % 以上と判定されたが KEK では 24 % 以下となるサンプルが見つかった。図 5.22 に KEK,HPK 毎の各測定での QE 測定結果の相関を示す。

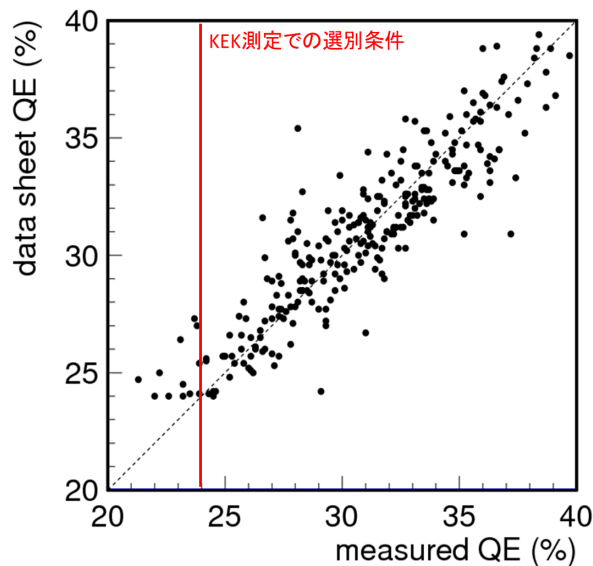


図 5.21: KEK 測定と HPK 測定での QE 測定値の相関

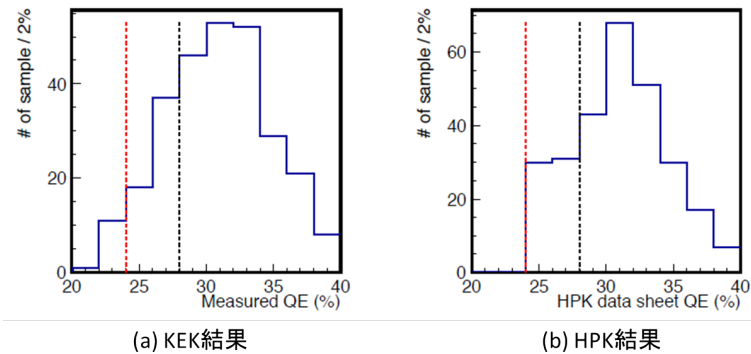


図 5.22: (a)KEK 測定及び (b)HPK 測定での HAPD の QE 分布。赤線は KEK での選別条件、黒線は典型的な QE 値を示す。

5.3 結果

2015 年 1 月までに 365 個の HAPD が KEK に届いた。KEK では到着した HAPD の電流測定、ノイズ測定、2 次元ヒット分布測定、総増幅率測定、量子効率測定を行い、測定の結果から、改めて良品の判定を行っている。KEK の判定結果を表 5.7 に示す。KEK で B ランクとなった個体の中には、電流流れ込み、安定性、高レートが組み合わさった症状を持つ HAPD も確認された。

B ランクの中でも『B ランク (安定性)』に関してはノイズ安定に時間を十分にかけることで使用可能であることから、実際に使用可能数は合格の 217 個、B ランク (安定性) の 5 個の計 222 個となり、全体の 75% 程度となった。現在のペースでは実機使用の 420 個を良品で選定できない状況であるため、今後、不良となったサンプルの交換や HAPD の増産を視野に入れる必要がある。また、KEK で B ランクとなったサンプルの詳細な測定・理解を行うことで、実機で使用できるか判断していく必要がある。

表 5.7: 量産版判定結果

	HAPD 個数
合格	217
B ランク (電流流れ込み)	19
B ランク (安定性)	5
B ランク (電流流れ込み + 安定性)	2
B ランク (電流流れ込み + 高レート)	1
不合格	21
合計	245

6 A-RICH 開発の今後の予定

6.1 モニタリングシステムの開発

Belle II 実験は 10 年に及ぶ長期の実験であり、検出器の応答特性の変動を監視することは長期的な測定精度の維持において重要な役割を担う。A-RICH 検出器では特に光子検出を行う HAPD の経年変動が予想され、専用のモニタリングシステムの開発を行っている。

モニタリングシステムの開発で考慮しなくてはならない点が 2 点ある。1 つ目はスペースの問題である。Belle II 検出器内で A-RICH に許される空間は限られており、設置位置も限られている。もう 1 つは HAPD が 1 光子程度に感度があるため、広い HAPD 領域において 1 光子程度の光を均一に広げる必要がある。

A-RICH 検出器では構造上、直接ファイバーのの光を検出器に入射できる位置にファイバーを設置することは困難であるため、新たな手法としてエアロゲルに光を当て、その反射光を検出器に分配する方法を採用する予定である。その概念図を図 6.1 に示す。エアロゲルは表面でレイリー散乱を起こすため、HAPD 側から入射した光子がエアロゲル表面で乱反射を起こし広範囲の HAPD に光子が送られることができる。

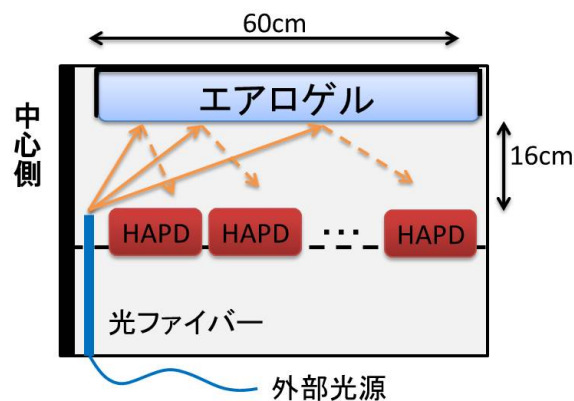


図 6.1: モニターシステム概念図。A-RICH 断面図を表している。A-RICH の有効半径は 60 cm である。

6.1.1 基礎試験

図 6.1 に示す手法における光の拡散度合を確認するため、エアロゲルに光を当て、その反射による光の拡散度合の検証を行った。まず、A-RICH と同様のセットアップを作成する。測定概念図を図 6.2 に示す。Cherenkov 光の疑似光源を浜松ホトニクス社 (株) のキセノンランプとし、光をファイバーで暗箱内に送る。使用したファイバーは Belle 実験 ACC で使用したファイバーと同じものである。暗箱内でファイバーの先を固定し、その 16 cm 先に 11 cm × 11 cm × 2 cm サイズのエアロゲルを 2 層重ねて設置した。光量の測定は光電子増倍管を使用した。2 層のエアロゲルは実機を考慮し、ブラックボックスで覆われた状態にする。測定では光電子増倍管を 60 cm (A-RICH の有効半径) まで少しずつ動かしてエアロゲルの反射による光の拡散の位置依存性の確認を行った。光電子増倍管から

の情報はアナログ信号なので、このアナログ信号の波高値をデジタル値に変換するアナログデジタル変換機 (ADC) を用いてデータの解析を行った。

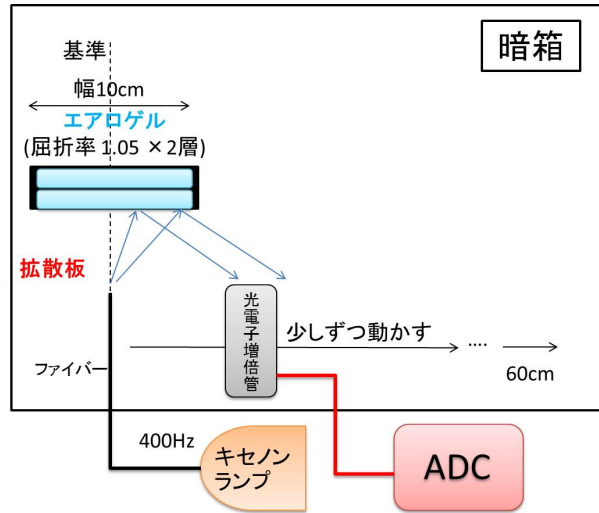


図 6.2: 検出器位置依存性の検証で用いたセットアップ概念図

6.1.2 基礎試験結果

測定で得られる結果は光電子増倍管が観測した光の量に対する波高値から得られたデジタル値である。このデジタル値を光量に変換する式を以下に示す。

$$N = 1.2 \times \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (6.1)$$

N は平均光子数、 μ は得られたデジタル値の分布をガウス関数でフィッティングしたときに得られる中心値、 σ は標準偏差の値である。式 6.1 を用い検出器位置での光量を見積もることができる。光量の位置依存性の結果を図 6.3(a) に示す。同図 (a) に結果より、光量位置依存性を関数で表現できることが分かったので、その関数を用い、光の一様性を見積もることができた。その結果を図 6.3(b) に示す。ファイバーを 0 cm から 56 cm まで 7 cm 毎に設置した場合を仮定した場合を考え、同図 (b) 上部の水色のラインが検出器に入射する光量値である。このとき、最大の光子数と最少の光子数の比が 1.3 となり、十分な一様性を確認することができる。また、同図 (b) の縦軸のスケールが数百個のオーダーで HAPD のピクセルに照射するには多すぎるが、測定で使用しているのは 3 インチの光電子増倍管であるため HAPD1 ピクセルの大きさに換算すると数個のオーダーとなり、これも要求される範囲に収まる。基礎試験ではシリカエアロゲルをプロトタイプのもの、光検出器を光電子増倍管、ファイバーを Belle 実験当時の使用品を用い測定を行ったが、モニタリングシステムに要求される程度の光量の一様性は、光をエアロゲルに反射させ拡散する方法で実現可能であることが分かった。

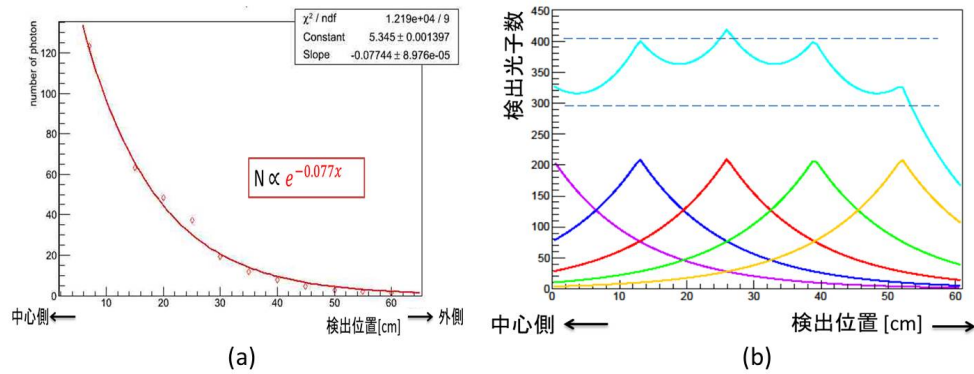


図 6.3: (a) 光量の位置依存性結果、(b) 光源を 7 cm 毎に設置した場合での光の一様性の検証

6.1.3 モニターシステム開発の今後

基礎試験の結果から要求される光量の一様性の確認は完了した。しかし、実機を想定し、以下に示す研究が今後必要と思われる。

1. シミュレーションを用いた光の一様性の確認と光源位置の選定
2. 実機使用品を用い、光の一様性の測定

シミュレーションは Geant4 を用いることで、A-RICH の全体の構造を仮定した検証が可能であり、シリカエアロゲルによって反射される光子の HAPD への分布の偏りの有無など詳細な評価を行う。基礎試験も A-RICH で実際に使用する装置と同等なものを用いて再度評価を行うことを計画している。図 6.4 に A-RICH モニターシステム用に開発された光ファイバーを示す。現在、光ファイバーの性能評価を進めている。



図 6.4: A-RICH モニターシステム用に開発された光ファイバー。従来のものよりも、照射窓の拡散範囲が広くなるよう設計された。

6.2 A-RICH 全体の予定

Belle II 実験は 2016 年開始を目標に各検出器や加速器の開発が進められている。我々の A-RICH も Belle II 開始に合わせて始動できるよう図 6.5 のスケジュールに沿って開発を進めている。2013 年 8 月から始まった HAPD の量産は 2015 年に完了する予定となっている。シリカエアロゲルの量産・性能評価は既に完了済みとなっている。読み出しシステムでは核となる SA03 の量産は既に終え、本研究成果により性能評価も完了した。FE ボード、Merger ボードは最終仕様が決定し、2015 年 4 月から量産を開始する。2015 年 6 月から HAPD に FE ボードを装着し、2015 年には A-RICH の組立が行われる。その間、A-RICH のモックアップを作成し、最終試験として宇宙線テスト等を行う予定となっている。Belle II 検出器へのインストールは 2016 年 3 月となり、2016 年 5 月に A-RICH が始動する。

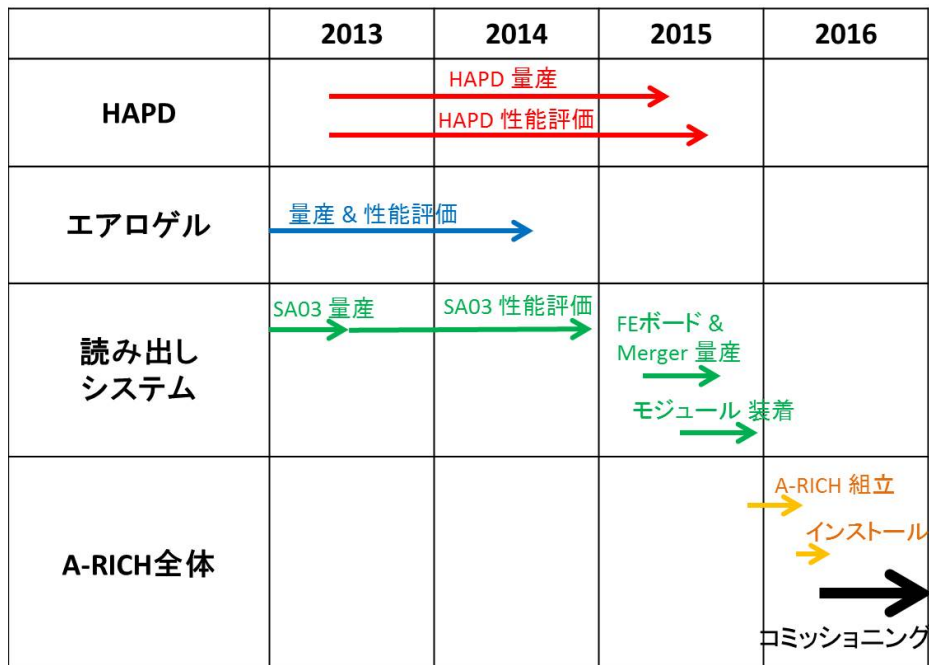


図 6.5: A-RICH の開発スケジュール

7 まとめ

Belle II 実験はつくば市高エネルギー加速器研究機構にある SuperKEKB 加速器を用いた、電子・陽電子衝突型加速器実験であり、加速器・検出器の双方をアップグレードし前身の Belle 実験と比べ 40 倍のルミノシティを達成し、標準模型の詳細な検証を行い、理論予測からの差異を探索することで標準模型を超える物理事象の探索を行う実験である。SuperKEK 加速器の建設は 2014 年までにほぼ終了し、Belle II 検出器 2017 年の測定開始に向けて建設が進められている。

本研究では A-RICH 検出器の Chrenkov 光子検出に用いる HAPD を選定するため、量産したものの性能評価手法を確立し、2014 年 12 月までに評価の完了した 277 台のについて Belle II 検出器での使用に耐えうるものかの評価を行った。この結果、本測定に使用可能なものは試験した個体の 75%にあたる 222 台に留まり、現在の生産予定数では A-RICH 検出器に使用する数である 420 台に到達できないことが明らかになった。今後は不良品の改修や増産などにより十分な個数の確保するための議論を進める。また、HAPD から読み出された光電子信号を処理する ASIC についてもはすでに予定した 2520 個の生産が完了しており、本研究では生産された ASIC の全数検査を行い、ASIC の持つ増幅機能やオフセット機能などの評価から ASIC の仕様を満たす 2081 個を選別した。このうち A-RICH 検出器に使用する 1680 個の ASIC を選定するため、ASIC の S/N 特性などの詳細な評価を行い、本実験に使用可能な 1738 個を選別することに成功した。

今後は、HAPD の測定を継続し実機に要する個数の確保を目指す一方で ASIC に関してはより詳細な性能検証を行い A-RICH 検出器へのインストールに向けて万全を期すとともにモニタリングシステムなどの開発を進め、Belle II 実験開始に備える。

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々のご支援いただきました。首都大学東京では住吉孝行教授、角野秀一准教授、汲田哲郎助教授をはじめ、同研究室の皆様とは大変有意義な研究生活を送ることができました。住吉孝行教授には Belle II 実験という世界有数の規模の国際実験参加という機会を与えていただき大変感謝しております。また、住吉孝行教授をはじめ角野秀一准教授、汲田哲郎助教授、松原綱之さん、今野智之さんにはこれまで、学会発表や修論執筆等で様々なアドバイス、研究に対する基本的な姿勢のご指導を頂きました。同期の伊東孝行君、清水沙也香さんとは高エネルギー実験研究室に在籍し始めた学部4年生のときから切磋琢磨して研究に取り組み、充実した研究室生活を過ごすことができました。また、岩田さんには特に Belle II 実験に携わるにあたって非常に多岐に渡りご指導いただきました。研究に関する様々なアドバイスに加え、研究に対するいろは教えていただき、本研究が成り立ちました。心より感謝いたします。皆様ありがとうございました。

そして、A-RICH 検出器開発グループに所属させていただきました、高エネルギー加速器研究機構の足立一郎准教授、西田昌平准教授に感謝いたします。西田昌平准教授には研究のアドバイスに限らず、発表資料の添削等でも、とても丁寧にご指導していただきました。ありがとうございました。

HAPD の共同開発を行った新潟大学の遊佐洋右助教授、片浦隆介君、小林哲也君、東邦大学の浜田尚さん、庵翔太君とは、ともに A-RICH 開発に向け研究を行ってまいりました。お世話になりました。また、他グループではありますが、名古屋大学の古村大樹君、米倉拓弥君、新潟大学の清野義敬君とはともに Belle II 実験に所属し、それぞれのグループにおける研究の最前線で苦楽を共にしてきた仲間です。今後はそれぞれ進む道は異なりますが、活躍を心より期待しております。

最後になりますが私が研究で携わるよう経済面に加え精神面でも支えとなっていたいただいた両親に心から感謝の意を述べさせていただきます、謝辞とさせていただきます。

A 小林・益川理論

CP 対称性の破れを理論的に説明するために様々な模型が提唱された。中でも、1973 年に小林誠・益川敏英両氏が提唱した理論はこれまでの観測結果と矛盾なく、また標準模型の範囲内で説明することができた画期的な理論であった。当時は、u, d, s の 3 種類のクォークしか確認されていなかったが小林・益川理論では 3 世代・6 種類のクォークの存在を予言し、6 種類のクォークが存在すれば自発的に CP 対称性の破れが導出できると提唱した [3]。

ここでは具体的に (Cabibbo-KobayashiMaskawa(CKM) 行列) V_{CKM} の表示を書き下す。最も一般的には

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

と書き表される。各要素 V_{ij} がその添え字に記されたクォーク間の混合の大きさに比例し、且つ、そのクォーク間の遷移振幅にも比例している。この表示は、各要素が遷移振幅などを表すことから理論においてよく使用されている。3 世代以上のクォークが存在するとした場合、CKM 行列には自発的に複素位相因子が導入され、この因子が CP 対称性の根拠となる。まずは CKM 行列に自発的に導入される複素位相因子について説明する。

一般的に $n \times n$ 行列のユニタリー行列には n^2 個の自由度が存在している。このとき、 $2n-1$ 個の自由度は混合に関する全てのクォーク場の複素位相を再定義することで除去することができる。したがって残った物理的に独立な自由度の数は

$$n^2 - (2n - 1) = \frac{n(n-1)}{2} + \frac{(n-1)(n-2)}{2}$$

となる。右辺第 1 項は物理的な回転角の自由度に対応し、第 2 項は残った複素位相に対応している。第 1 項 (回転角) は CP 変換に無関係なので、CP 変換に対し混合状態のクォーク場が符号を変え対称性を破るためには第 2 項の複素位相が存在しなければならないことがわかる。

実際の実験データを解析するために次のパラメータ表示もまたよく使用される。4 つのパラメータ (λ, A, ρ, η) を導入し、CKM 行列を以下のように表すことができる。

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

この表示を Wolfenstein 表示と呼んでいる。この時、 $\mathcal{O}(\lambda^4)$ 以上の項は無視している。また semi-leptonic 崩壊実験により、 $\lambda \simeq 0.22$ なども求められている。A.2 において V_{td}, V_{ud} に対応する行列要素での複素位相が小林・益川理論における CP 対称性の破れを表す部分である。また CKM 行列のユニタリー性を用いると右辺が 0 となる 6 つの恒等式が得られ、そのうちの 1 つを以下に示す。

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{td}V_{tb}^* + V_{cd}V_{cb}^* = 0 \quad (\text{A.3})$$

左辺の項 VV^* は Wolfenstein パラメータ (ρ, η) による複素平面上ベクトルとして表すことができる。両辺を $V_{cd}V_{cb}^*$ で割り、Wolfenstein パラメータを代入すると以下のように書くことができる。

$$\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + 1 = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} \approx -\rho - i\eta = -\sqrt{\rho^2 + \eta^2}e^{i\phi_3}$$

$$\frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} \approx -1 + \rho + i\eta = -\sqrt{(1-\rho)^2 + \eta^2}e^{i(\pi-\phi_1)}$$

A.3 を図示したものが図 A.1 であり、Unitarity Triangle と呼ばれ、三角形がつぶれずに 3 辺が閉じていれば小林・益川理論は正しいことが証明される。

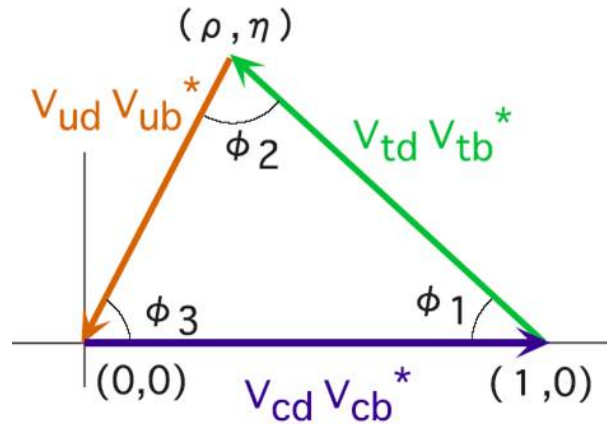


図 A.1: Unitarity Triangle

B SA03 測定結果のデータベース化

オフセットレベルは 16 段階 × 36 チャンネル分が配列して 1 つのファイルに入っている。微調節・粗調節のスロープは 36 チャンネル分が 1 つのファイルに入っている。増幅率は 36 チャンネル分の 4 段階の増幅率の値が配列化され 1 つのファイルに入っている。表 B.1 に取得データと、対応するデータが入っているテキストファイル名を示す。ファイルの保存先は首都大学東京 8 号館 149 室にある SA03 解析用 PC 内に保存してある。

表 B.1: 取得データとデータベース。〈シリアル〉にはナンバリングで実際に SA03 に記述されている番号が入る。

取得データ	データベースファイル名	ファイルの保存先
粗 16 段階のオフセット	〈シリアル番号〉_offset.c.txt	/home/masspro_sa03/data /<シリアル番号>/
微 16 段階のオフセット	〈シリアル番号〉_offset.f.txt	
粗調節のスロープの値	〈シリアル番号〉_offset.c.txt	
微調節のスロープの値	〈シリアル番号〉_offset.f.txt	
4 段階の増幅率	〈シリアル番号〉_gain.txt	

C SA03 詳細測定

詳細な増幅率測定

より高い波高値領域での SA03 の振る舞いや、より精密な増幅率測定を行うため、良品と選定した 2081 個でテストパルスを入力を 0 mV (入力なし) から 350 mV まで 10 mV 刻みで変化させ、増幅率の測定を行った。検査システムでの増幅率測定は約 1 時間、詳細な増幅率測定には約 6 時間の測定時間がかかるため、現在も測定が進められている。良品 1 チャンネルでの詳細な増幅率測定の一般的な結果を図 C.1 に示す。高い波高値領域でもサチュレーションすることではなく、複数個光子 (本測定では 4 光子程度まで) が飛来した時にも使用可能であることがわかる。

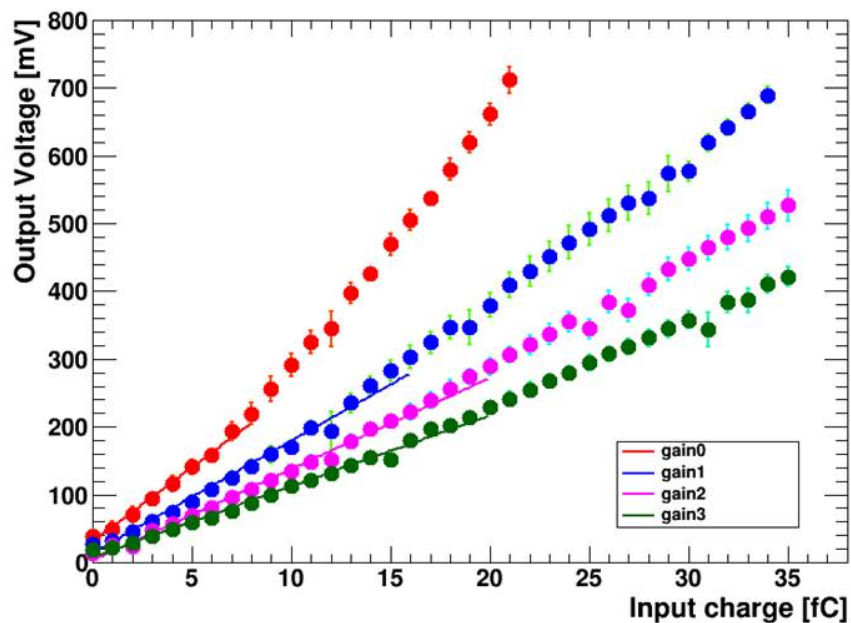


図 C.1: より詳細な増幅率測定の結果

詳細なオフセット調節機能の確認

オフセット調節を行う 4bit DAC は粗調節・微調節で独立であり、原理的にはどの粗調節の位置であっても微調節の 16 段階のステップの傾きは同じになるはずである。検査システムでは時間短縮のため粗・微調節を各 16 段階ずつのみ測定していた。しかし、実機では使用する粗調節の位置はサンプルによって異なるので、粗調節 16 ステップ毎の微調節を含む全 256 段階のオフセットレベルを確認する必要がある。検査システムでの測定時間は 1 時間半であるのに対し、全 256 段階測定には約 13 時間かかるため、良品の一部で本測定を行った。良品 1 チャンネルでの全 256 段階のオフセットレベル測定結果を図 C.2(a) に示す。また得られた 16 個の微調節スロープの度数分布を C.2(b) に示す。同図 (b) からわかるように 16 個の微調節スロープのばらつきはほぼないということがわかる。この結果、検査システムで評価した微調節のスロープの値は、どの粗調節の位置のものであっても有効であることがわかった。

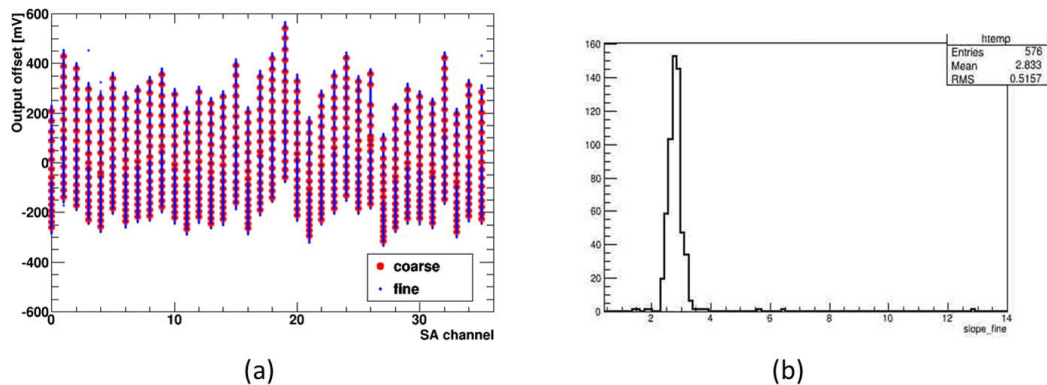
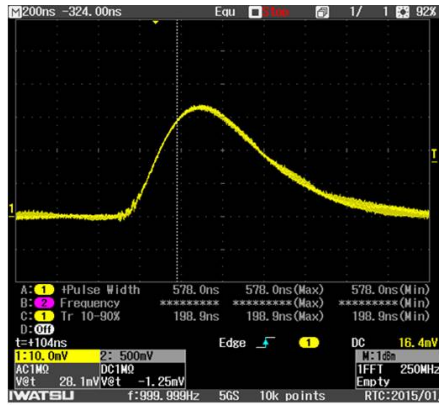


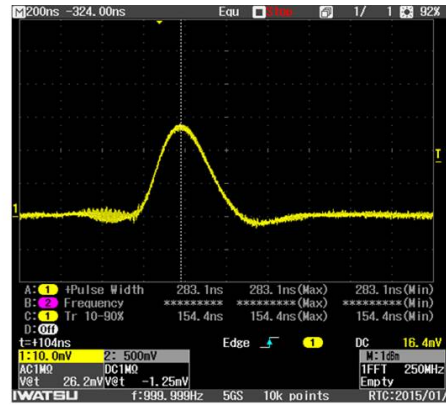
図 C.2: (a) 全 256 段階でのオフセット調節機能結果、(b) 微調節スロープの度数分布

波形整形機能の確認

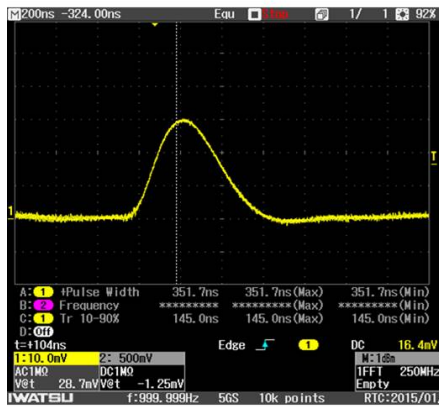
SA03 の波形整形機能は先に述べたように、HAPD の放射線損傷による影響を軽減する重要な役割を担う。図 4.6 に示したように、最適値が 100 ns ~ 200 ns であるため、設計値もこの範囲に設定できるよう内部回路が組まれている。そのため、4 段階の shaping time の値が最適値の範囲に設定できるかどうかの確認を行う必要があった。測定方法は、SA03 にテストパルスからの信号を入力し、設定した shaping time 毎にその出力波形をオシロスコープで確認するという方法である。shaping time の定義は波形の立ち上がりから立ち下りまでの時間とした。典型的な 4 段階の shaping time の結果を図 C.3 に示す。同図で紹介したサンプルに関しては最適値に設定が可能である。



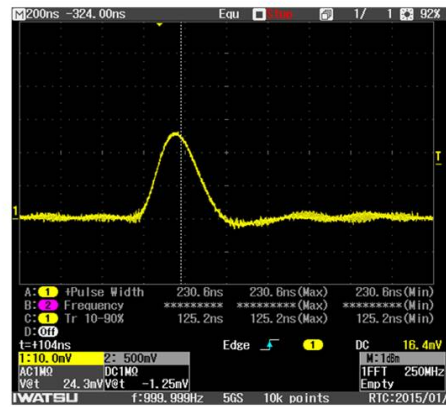
(a) 198 ns



(b) 154 ns



(c) 145 ns



(c) 125 ns

図 C.3: 4段階の波形整形結果

現在、良品と明記した 2081 個の SA03 において全数での shaping time の確認を行っている。本論文ではまとめることができなかったが、shaping time の値もデータベースに残す予定である。

参考文献

- [1] U. Amaldi, W. de Boer, and H. Furstenau, *Phys. Lett.* 260B (1991) 447
- [2] A. D. Sakharov, “Quark-Muonic Currents and Violation of CP Invariance”, *JETP Lett.* 5, pp.27-30 (1967)
- [3] M. Kobayashi and T. Maskawa, “CP-Violation in the Renormalization Theory of Weak Interaction”, *Prog. Theor. Phys.* 49, pp.552-657 (1973)
- [4] 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]
- [5] A. G. Akkeroyd, et al. [BELLE collaboration], “Physics at Super B Factory”, arXiv:1002.5012v1 [hep-ex].
- [6] A. J. Bevan, et al. [BELLE collaboration], “The Physics of the B Factories”, arXiv:1406.6311 [hep-ex].
- [7] [CKMfitter Group], <http://ckmfitter.in2p3.fr//plots ICHEP12/>
- [8] [HFAG Group], <http://www.slac.stanford.edu/xorg/hfag/triangle/summer2014/index.shtml>
- [9] [CKMfitter Group], “Preliminary results as of Summer 2014 (CKM 2014 conference)”, http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_ckm14/ckm_res_ckm14.html
- [10] M. Nakao, T. Higuchi, R. Itoh, and S.Y. Suzuki, “Data Acquisition System for Belle II”, *JINST* 5, C12004 2010
- [11] D. Suna, *et al.*, “Belle2Link: A Global Data Readout and Transmission for Belle II Experiment at KEK”,
- [12] T. Higuchi, *et al.*, “Modular Pipeline Readout Electronics For The Superbelle Drift Chamber”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* vol. 52, no. 5, pp. 1912 - 1917, Oct. 2005.
- [13] R. Itoh, *et al.*, “Data Flow and High Level Trigger of Belle II DAQ System”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* vol. 60, no. 5, pp. 3720 - 3724, Oct. 2013.
- [14] T. Abe et al. “Belle II Technical Design Report”, arXiv:1011.0352v1 [physics.ins-det]
- [15] 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
- [16] M. Tabata et al. “Recent progress in the development of large area silica aerogel for use as RICH radiator in the Belle II experiment”, PoS(TIPP2014)327.
- [17] 岩田修一 首都大学東京理工学研究科物理学専攻 修士論文 (2010)

-
- [18] 黒田英諒 首都大学東京大学院理工学研究科 修士論文 (2010)
- [19] 高垣英幸 首都大学東京理工学研究科物理学専攻 修士論文 (2011)
- [20] 坂下 嘉徳 首都大学東京理工学研究科物理学専攻 修士論文 (2012)
- [21] SiTCP home page, <http://research.kek.jp/people/uchida/technologies/SiTCP/>
- [22] XILINX home page, <http://japan.xilinx.com/>
- [23] AD5235 data sheet, http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5235.pdf
- [24] CD74HC4051E data sheet, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hct4053.pdf>
- [25] LAN8710 data sheet, <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/SMSC/LAN8710.pdf>