

2012年度 修士論文

**Belle II 実験のエンドキャップ粒子識別装置用光検出器
とその信号読み出しシステムの開発**

平成25年1月10日

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻
高エネルギー実験研究室 博士前期2年
学籍番号 11879314

坂下 嘉徳

概要

現在、高エネルギー加速器研究機構において電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器 Super KEKB が建設中であり、それを用いた素粒子実験 Belle II が 2016 年から開始される予定である。前身の Belle 実験では Belle 検出器と KEKB 加速器を用い電子・陽電子衝突により生成された大量の B 中間子の崩壊過程を精密に調べることで、B 中間子系での CP 対称性の破れの存在を証明した。さらに標準模型を超える新しい物理の存在を示唆する結果も含まれていたが、統計数が足りず確定的な証拠となっていない。そのため加速器を更にルミノシティの高い Super KEKB 加速器に、検出器をより高精度な Belle II 検出器にアップグレードし新しい物理の観測を目的とした実験が Belle II 実験である。

Belle II 実験では高精度の測定が要求されることから、高い粒子識別性能が要求される。そのために検出器のエンドキャップ部の粒子識別装置にはシリカエアロゲルを輻射体とする Ring Imaging Cherenkov counter (A-RICH) を採用する。A-RICH は Cherenkov 光をリングイメージで捉えることで 4 GeV/c までの運動量領域において、 4σ の精度で K 中間子と π 中間子の識別を目指す。リングイメージを十分な精度で検出するためには、5 mm 以下の位置分解能を持ち、単一光子の検出が可能であることが光検出器に要求される。そこで我々は、73 mm × 73 mm の領域に 144 チャンネルを持つ、マルチアノード型 Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) を 2002 年より浜松ホトニクス社と共同で開発してきた。

HAPD の増幅率は 10^5 程度であり、かつ A-RICH 全体として総計 400 台を超える HAPD を使用することから、信号読み出しシステムとしては低雑音で高増幅率のアンプ機能、高集積化されコンパクトな形状、多チャンネル同時読み出しが求められる。そのためフロントエンドとして A-RICH 専用の ASIC 「SA シリーズ」の開発を行っており、ASIC と FPGA という 2 種類の集積回路を搭載した読み出しボードを用いることによりこの要求を満たす。これら HAPD と ASIC を用いたシステムでのビーム試験において、 4σ を超える K 中間子と π 中間子の識別性能が確認されている。

しかし、A-RICH は Belle II 実験中に大量のガンマ線、中性子バックグラウンドに曝されながら 10 年間の運用に耐える必要がある。特に影響を受けるのが半導体素子からなる HAPD である。

原子炉から発生する中性子を HAPD に照射する試験の結果、HAPD 内の Avalanche Photo diode (APD) の P 層を薄くすることで中性子損傷の影響を低減できることがわかっている。同時に読み出し時に波形整形回路の時定数を短縮することで中性子損傷によるノイズが低減できることが確認できたため、時定数を短縮した新たな ASIC の開発を行った。

また⁶⁰Co線源を用いてHAPDにガンマ線を照射する試験の結果、APDに印加する逆バイアスが定格電圧以下で絶縁破壊する事が確認された。この現象は、半導体内部の損傷ではなくAPD表面の保護膜の帯電によるものと考えられる。このため、表面保護膜を形成しない製法を新たに立ち上げた。

以上の現状を鑑みて、本研究では中性子およびガンマ線対策を施した数種類のHAPDを製作し、中性子およびガンマ線の影響を調べた。まず、これらのHAPDに対して中性子照射試験を実施して性能評価を行い、さらに引き続いてガンマ線照射試験を実施して再び性能評価を行った。その結果、中性子およびガンマ線がHAPDに与える影響は互いに独立であり、さらにそれらへの対策も独立かつ期待通りに働くことが分かった。これらのHAPDの性能評価の結果、10年間のBelle II実験の運用に耐えるものがあることを確認し、Belle II実験用量産機の仕様を決定した。また、中性子損傷によるノイズ対策として波形整形回路の時定数を短縮した新たなASICの性能評価を行い、ほぼ期待通りの要求を満たすことを確認した。さらにそのASICを搭載した読み出しボードを製作し、放射線照射したHAPDを用いて時定数短縮の効果を評価した。

以上の研究により、Belle II実験の高放射線環境下に耐えうるA-RICHのためのHAPD量産機の仕様の決定と読み出しボードの評価を行った。

目次

概要	4
1 序論	4
1.1 物理的背景	5
1.1.1 CP 対称性の破れ	5
1.1.2 CKM 行列と Unitary Triangle	7
1.2 B-factory 実験	7
1.3 Belle II 実験での新しい物理	11
1.3.1 前後方非対称度の精密測定	11
1.3.2 $B \rightarrow \tau\nu$ における荷電ヒッグス粒子探索	11
2 SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器	14
2.1 SuperKEKB 加速器	14
2.2 Belle II 検出器	16
2.2.1 PXD, SVD	18
2.2.2 CDC	20
2.2.3 TOP	20
2.2.4 Aerogel-RICH	22
2.2.5 ECL	22
2.2.6 KLM	23
3 Aerogel-RICH の原理	26
3.1 検出原理	26
3.1.1 Cherenkov 光発生原理	26
3.1.2 ACC 検出原理	27
3.1.3 A-RICH 検出原理	29
3.2 A-RICH の構造	31
3.2.1 シリカエアロゲル	31
3.2.2 光検出器	33
3.2.3 読み出しシステム	35
3.3 A-RICH の性能評価	38
3.4 A-RICH 開発における課題	39
3.4.1 HAPD の放射線耐性	39
3.4.2 読み出しボードの開発	39

4	HAPD の放射線耐性	40
4.1	中性子の影響と対策	40
4.1.1	中性子発生原理と影響	40
4.1.2	中性子対策	42
4.2	ガンマ線発生原理と影響	45
4.3	過去のガンマ線照射試験	47
4.3.1	照射セットアップ	47
4.3.2	照射サンプル	48
4.3.3	照射試験結果	49
4.3.4	ガンマ線対策	51
4.4	HAPD の放射線耐性のまとめ	54
5	HAPD の放射線照射試験	55
5.1	放射線照射試験の目的	55
5.2	最終仕様候補 HAPD	55
5.3	中性子照射試験	57
5.3.1	中性子照射施設	57
5.3.2	中性子照射セットアップ	57
5.3.3	中性子照射試験結果	60
5.3.4	中性子照射試験まとめ	67
5.4	ガンマ線照射試験	68
5.4.1	ガンマ線照射試験概要	68
5.4.2	ガンマ線照射試験結果	69
5.4.3	ガンマ線照射試験まとめ	73
5.5	HAPD 量産機を選択	73
6	A-RICH 読み出しボードの開発	74
6.1	読み出しボード搭載 ASIC	74
6.1.1	SA シリーズの構成	74
6.1.2	SA シリーズのパッケージ	80
6.2	SA03 性能評価	81
6.2.1	セットアップ	81
6.2.2	性能評価項目	81
6.2.3	性能評価方法	82
6.2.4	性能評価	83
6.2.5	SA03 の選択	92
6.2.6	SA03 性能評価まとめ	93
6.3	読み出しボード	93
6.4	SA03 搭載読み出しボードの性能評価	96

6.4.1	性能評価セットアップ	96
6.4.2	放射線照射 HAPD を用いた測定	98
6.5	A-RICH 読み出しボードの開発のまとめ	101
7	まとめ	102
	謝辞	104
	参考文献	105

1 序論

今日の素粒子物理学では標準模型 (Standard Model) の検証のため世界中で様々な実験が行われており, 100 GeV 以下においてその正しさが確立されてきた。1999 年 6 月から 2010 年 6 月まで茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) (図 1.1) で行われていた Belle 実験は, 標準模型に導入されている小林・益川理論で予言されている CP 対称性の破れを観測する事を主目的とした実験である。Belle 実験は B-factory 実験の一つであり KEKB 加速器において電子・陽電子を加速・衝突させ B 中間子を大量に生成し, Belle 検出器を用いて B 中間子の崩壊過程を精密に測定する。この実験によって目的である B 中間子系での CP 対称性の破れの発見と共に, 新粒子 X(3872) の発見等の多大な成果を挙げた。しかし標準模型は階層性の問題, ニュートリノ質量が導入されていない事, 暗黒物質・暗黒エネルギーが説明できない事等の不十分な点もある。これらの問題を解決するた

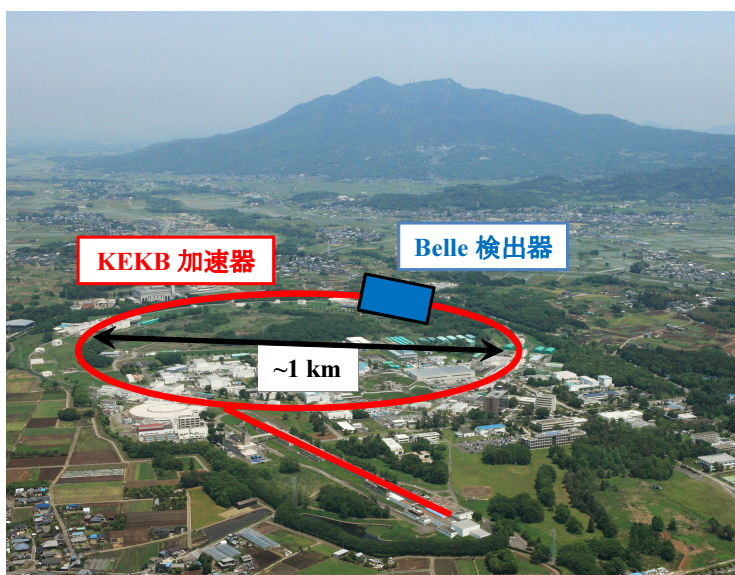


図 1.1: KEK

め標準模型を超える物理として超対称性理論や余剰次元理論等が候補にあげられるが, いずれの理論も TeV スケールのエネルギーに新しい物理法則があると考えられている。そのため粒子を高エネルギーで衝突させるエネルギーフロンティア実験において新粒子を生成・観測すること, 高頻度で粒子を衝突させるルミノシティフロンティア実験においてフレーバー構造を明らかにすることが必要である。現在, エネルギーフロンティア実験はスイスの欧州合同原子核研究機構 (CERN)

において Large Hadron Collider(LHC) が稼働しており、標準模型で唯一発見されていなかったヒッグス粒子と思われる粒子を発見する等の成果をあげている [1]。しかし標準模型を超える物理は未だ発見されていない。ルミノシティフロンティア実験としては Belle 実験で使用した Belle 検出器と KEKB 加速器をアップグレードさせる Belle II 実験が計画されている。

本章では Belle II 実験を行う上での物理的背景と Belle 実験の結果、Belle II 実験で目指す物理を説明する。

1.1 物理的背景

1.1.1 CP 対称性の破れ

1956 年までパリティ保存はエネルギー保存則等と同じようにいかなる反応においても保たれると考えられてきた。しかし 1956 年に T. D. Lee と C. N. Yang は弱い相互作用が関与する物理現象においてパリティ対称性は破れているという仮説をだし、それらを検証する実験をいくつか提唱した [2]。この仮説は 1957 年に C. S. Wu らによって偏極した放射性同位体 ^{60}Co の β 崩壊により正しい事が証明された [3]。粒子-反粒子間の対称性のため、1957 年に L. D. Landau によって CP 対称性が提唱された [4]。しかし 1964 年に J. W. Cronin と V. L. Fitch らによって行われた実験によって CP 対称性の破れが観測された。中性 K 中間子 K^0 には K_L と K_S が存在し、 K_L は CP 固有値が -1 の 3π 系に、 K_S は CP 固有値が $+1$ の 2π 系に崩壊すると考えられていた。そこで図 1.2 の検出器の左部から K_L ビームを入射し、中央部で K_L が 3π 系に崩壊した内の π^+ と π^- を右部の 2 つの検出器でそれぞれ検出する。 K_L が 2π 系に崩壊していれば、運動量の総和 \vec{P} と入射角のなす角度 $\theta = 0$ 、不変質量 m^* は K_L の質量 497.7 MeV となるはずである。

図 1.3 は $494 \text{ MeV} < m^* < 504 \text{ MeV}$, $\cos \theta > 0.9995$ でのイベント数分布である。この結果から K_L が 2π 系に崩壊する事が確認され、CP 対称性が破れている事が発見された [5]。CP 対称性の破れを説明するために、電磁相互作用や強い相互作用によって CP 対称性を破ろうとする模型や、新たな相互作用として超弱相互作用を仮定し CP 対称性を破る模型などの様々な模型が提案された。1973 年に小林誠と益川敏英によって提唱された小林・益川模型はそれまでの観測結果とは矛盾せず標準理論の範囲で CP 対称性の破れの理論的な説明ができる模型である。この模型では当時 3 種類しか発見されていなかったクォークが 3 世代 6 種類以上存在すれば CP 対称性が破れることが説明できた [9]。

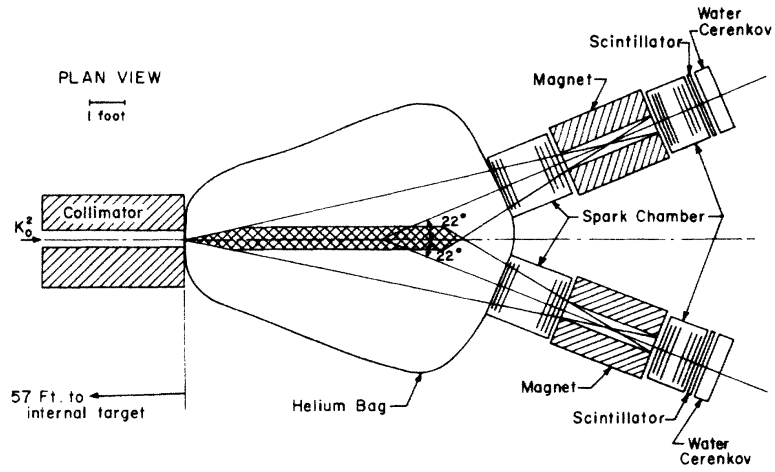


図 1.2: detector 部の概略図

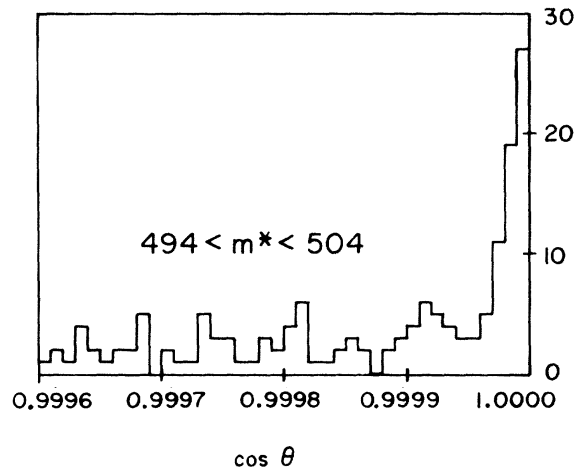


図 1.3: $\cos \theta > 0.9995$ でのイベント数分布
 3π 崩壊では見られないピークが見られる

1.1.2 CKM 行列と Unitary Triangle

現在確認されているクォークが 3 世代であるので今後はクォークの世代数を 3 として考える。小林・益川模型では弱い相互作用を通しての世代間混合は

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

と表される。ここで d', s', b' は弱い相互作用の固有状態、 d, s, b は質量固有状態を表す。この 2 つの固有状態を結び付けている 3×3 の行列を Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 行列と呼び V_{CKM} と表す。CKM 行列の各要素 V_{ij} ($i = u, c, t, j = d, s, b$) は j クォークから i クォーク (もしくは \bar{i} クォークから \bar{j} クォーク) への遷移振幅、複素共役 V_{ij}^* は逆過程における遷移振幅に対応している。小林・益川理論において CKM 行列の中に複素位相が存在することにより CP 対称性が破れる事が示された。この CKM 行列をパラメータ (A, λ, ρ, η) を用いる Wolfenstein 表示 [10] を用い、 $\mathcal{O}(\lambda^3)$ までの項で表すと

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

となる。CKM 行列はユニタリ行列であるので複素位相を含む V_{ub}, V_{td} に対して以下の式が成り立つ。

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

左辺の項 $V^* V$ は Wolfenstein 表示のパラメータ (ρ, η) で表される複素平面上的のベクトルとして表すことができ、 $\rho\eta$ 平面上に Unitary Triangle と呼ばれる図 1.4 の様な三角形を描く事が出来る。

Unitary Triangle の内角を CKM 行列の各要素で表すと

$$\phi_1 = \arg \left(\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right), \quad \phi_2 = \arg \left(\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right), \quad \phi_3 = \arg \left(\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{ud} V_{ub}^*} \right) \quad (1.4)$$

となる。Unitary Triangle の各辺の長さや角度の大きさを精密に測る事で CP 対称性の破れの大きさを検証する事ができる。また、Unitary Triangle が崩れていることが確認されれば標準模型を超える新しい物理の手がかりになるため、精度の高い測定を行う必要がある。

1.2 B-factory 実験

標準模型により b クォークを含む B 中間子系の CP 対称性の破れは K 中間子系と比較して大きいことが期待された。しかし中性 K 中間子の 2 つの固有状態 K_s ,

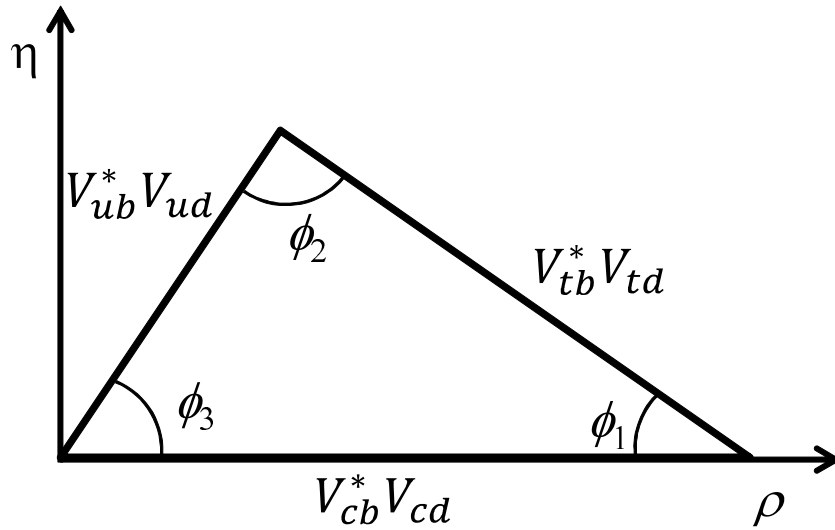


図 1.4: unitary triangle

と K_L の寿命はそれぞれ $\sim 10^{10}$ s と $\sim 5 \times 10^8$ s と 500 倍程も違うため正確に識別できるのに対し、中性 B 中間子の寿命は $\sim 10^{12}$ 程と短く B_0 と \bar{B}_0 の寿命差を識別することが困難であった。この困難を解決するため非対称エネルギー衝突と呼ばれる手法が考えられた。それまでの衝突型加速器では等しい運動量同士で衝突させ、衝突後の系全体の総運動量を 0 にする方法が一般的であった。しかし非対称エネルギー衝突では異なる運動量で衝突させることで衝突後の系に Lorentz boost を生じさせ、崩壊時間を相対論的に引き延ばすというものである。また B 中間子を大量に生成し統計誤差を小さくするため、高いルミノシティの加速器も必要である。この様に非対称エネルギーで電子・陽電子を衝突させ大量に B 中間子対を生成し、B 中間子系での CP 対称性の破れの観測を目的とした衝突型加速器実験を B-factory 実験と呼ぶ。

現在までに行われた B-factory 実験は Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) の PEP-II 加速器による BaBar 実験と、KEK の KEKB 加速器で行われた Belle 実験である。これらの実験により主目的であった B 中間子系での CP 対称性の破れを観測し、2002 年に実験的に小林・益川理論を証明することに成功した。その結果、2008 年に小林・益川理論の提唱者である小林誠、益川敏英両氏はノーベル物理学賞を受賞した。

B 中間子は e^+e^- の対消滅により生じる $\Upsilon(4s) = (b\bar{b})$ というボトモニウム共鳴状態が $B^0\bar{B}^0$ 対を生成する事を利用して作られる。 $\Upsilon(4s)$ の質量は $10.58 \text{ GeV}/c^2$ であるため、 e^+e^- の重心系衝突エネルギーはこの値になるように設定されている。CP 対称性の破れを観測する際のメインとなるのが Golden mode とも呼ばれてい

る $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ である。図 1.5 は $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ の diagram である。図 1.5 左図のような 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が興味があるモードである。しかし図 1.5 右図の様に box diagram を通じて B^0 から \bar{B}^0 へ遷移したのち $J/\psi K_s$ に崩壊するモードも発生し、これも CP 固有状態であるため、終状態からでは親粒子が B^0 か \bar{B}^0 かを同定することはできない。そこで $\Upsilon(4s) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$ 崩壊のうち CP 固有状態 $f_{CP} = J/\psi K_s$ に崩壊する方ではなく、反対側の崩壊モードを観測することで親粒子の同定を行う。この様にして親粒子を同定する方法を Flaver tagging, CP 固有状態 f_{CP} に崩壊するモードを CP side, 反対側を tag side とする。図 1.6 は Belle 実験での $B^0 \bar{B}^0$ 生成とその後の崩壊の概念図である。ここでは B^0 側を tag side として確定することで反対側を \bar{B}^0 と同定している。tag side の B^0 から崩壊した荷電粒子である \bar{D}^0 , π^- , μ^+ は CP 固有状態ではないため、それ以外の量子数から B^0 と同定することが出来る。そのため CP side の親粒子は \bar{B}^0 であると同定できる。

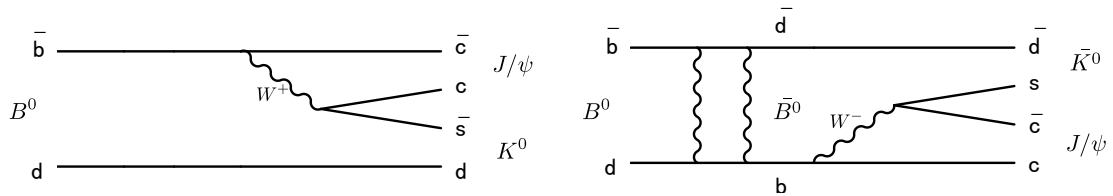


図 1.5: $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ の diagram

左図が B^0 から直接崩壊するモードであり、右図は Box diagram を介して \bar{B}^0 に遷移してから崩壊するモード。

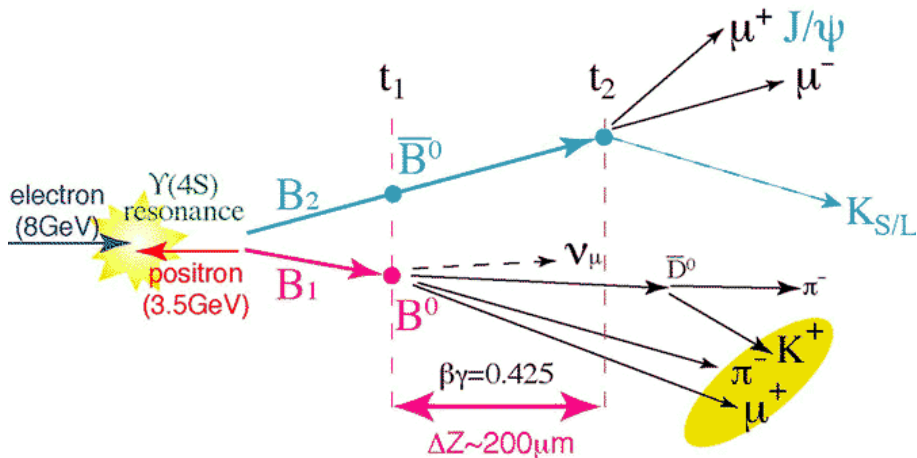


図 1.6: B 中間子の終状態への崩壊の概要

この図では \bar{B}^0 側が CP side, B^0 側が tag side である。

CP 対称性の破れの大きさを観測することは、 B^0 と \bar{B}^0 が $f_{CP} = J/\psi K_s$ への崩壊する時の寿命差を観測することである。 B^0 が $f_{CP} = J/\psi K^0$ (K^0 は K_s^0 か K_L^0 として観測される) へと崩壊したと同定された事象についての崩壊時間分布と、 \bar{B}^0 のそれを比較したものが図 1.7 である。終状態が CP 固有状態 (f_{CP}) の時 ξ_f は $CP|f_{CP}\rangle = \xi|f_{CP}\rangle$ で定義され、 $\xi = \pm 1$ である。したがって $q = +1$ の赤いプロットが $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s$ であり、 $q = -1$ の青いプロットが $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ のデータである。時間依存の CP 非対称度 $a_f(t)$ は

$$a_f(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) - f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) - f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(t) - f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) - f_{CP})} \quad (1.5)$$

で定義され、特に終状態 $J/\psi K^0$ の CP 非対称度は

$$a_{J/\psi K^0}(t) = \sin 2\phi_1 \sin(\Delta M \Delta t) \quad (1.6)$$

と計算される [6]。 ΔM は B^0 の CP 固有状態である B_1, B_2 の質量差であり、 ϕ_1 は Unitary Triangle の 1 角である。そのため、 ΔM を精度良く求めれば Unitary Triangle の角 ϕ_1 を決定することが出来る。

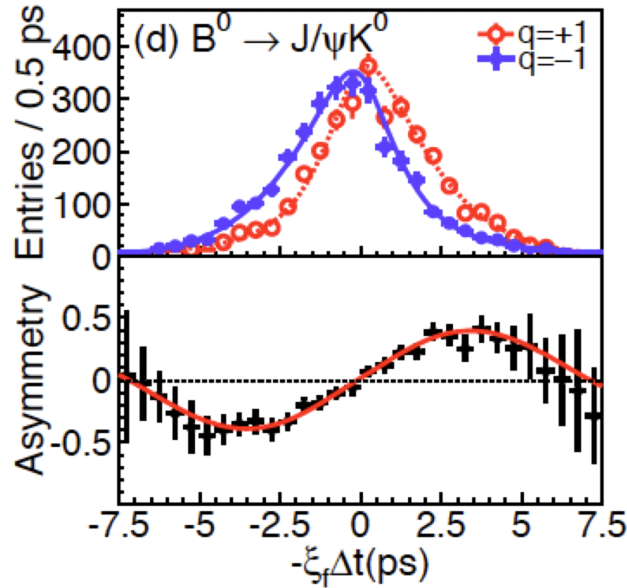


図 1.7: $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ の崩壊時間 δt の分布 (上) とその結果から得られた CP 非対称度 (下)

1.3 Belle II 実験での新しい物理

標準模型はこれまでの実験的結果を説明することができたが、階層性の問題やニュートリノ質量が導入されていない事等の未解決の問題がある。これらの問題を解決するために超対称性理論や余剰次元理論などの様々な理論が提案されており、それらの理論では TeV 領域に新しい物理があると考えられている。新しい物理によって存在が予言されている新粒子を直接観測するために LHC は TeV オーダーでの陽子陽子衝突実験を行っている。これらの新しい物理は B 中間子等の b, c を含むハドロン系、 τ といった重いレプトンの崩壊過程に影響し、高次の loop に新粒子が現れると考えられている。Belle II 実験は新しい物理が関与する稀な崩壊を、Belle 実験よりもさらに大量に B 中間子を生成し精密に観測することで、新しい物理の間接的発見を目指している。以下に Belle II 実験で観測が期待される新しい物理が関与する崩壊例を挙げる。

1.3.1 前後方非対称度の精密測定

図 1.8 は電弱崩壊 $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ の diagram である。 K^* 中間子の方向に対して l^+ の方向が前方側の事象数と後方側の事象数の差を全事象数で割った値である前後方非対称度 A_{FB} の Belle 実験での測定結果を図 1.9 に示す [7]。標準模型において A_{FB} は図 1.9 赤線の様になると予言されているが、新しい物理が存在するとその振舞いに変化する事が予測されている。Belle の結果では標準模型の予言よりやや大きい値をとっているため Belle II での精密測定により新しい物理の発見が期待される。

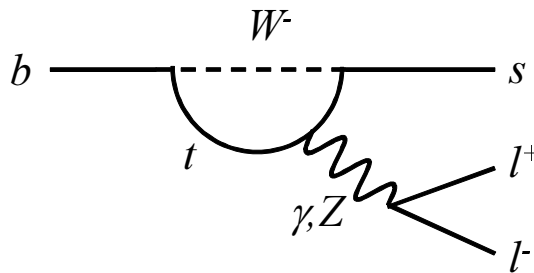


図 1.8: $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ 崩壊の diagram

1.3.2 $B \rightarrow \tau \nu$ における荷電ヒッグス粒子探索

標準模型を超える新物理の多くは荷電ヒッグス粒子の存在が予言されている。図 1.10 は $B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊の diagram である。標準模型では荷電ウィークボゾン (W^\pm)

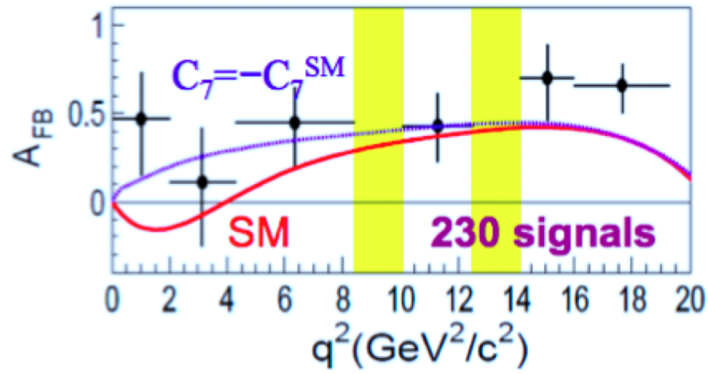


図 1.9: Belle 実験での前後方非対称度の測定結果
赤線は標準模型における予言値

の交換で起こるが、荷電ヒッグス粒子が存在するとツリーレベルで影響し、崩壊分岐比が標準模型から大きく変化する。図 1.11 は $B \rightarrow \tau\nu$ の崩壊分岐比の世界平均である [8]。標準模型から予測される値と 2.8σ 程度ずれているため、Belle II 実験において精密測定が期待されている。

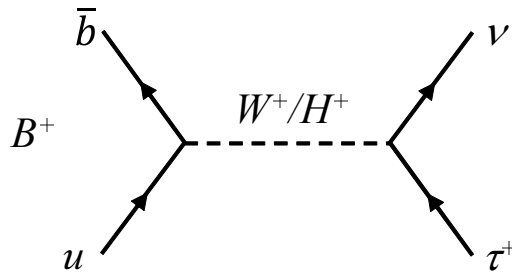


図 1.10: $B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊の diagram

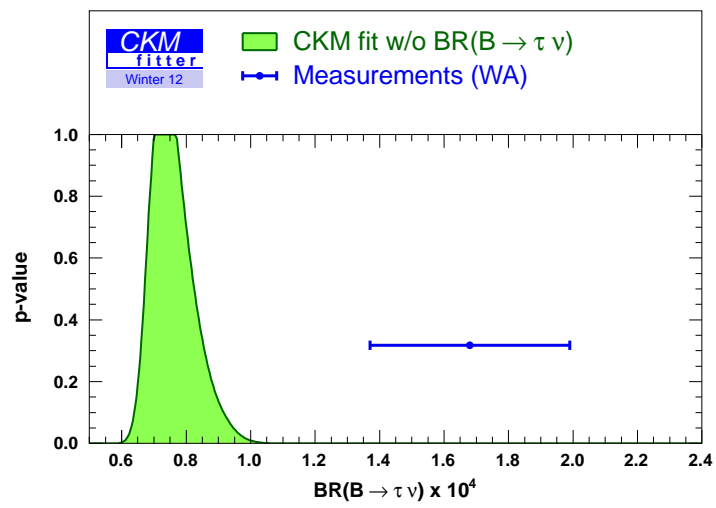


図 1.11: $B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊分岐比の世界平均

2 SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器

本章では 2016 年に開始予定の Belle II 実験に向けて開発が進められている SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器の概要を説明する。SuperKEKB 加速器は KEKB 加速器よりより多くの事象数を獲得するためにルミノシティが 40 倍にアップデートされ、Belle II 検出器は事象を高精度で観測できるよう Belle 検出器の改造が進められている。

2.1 SuperKEKB 加速器

2010 年まで行われていた Belle 実験で使用されていた KEKB 加速器は全長 600 m の線形加速器 (LINAC) で電子を運動量 8 GeV/c, 陽電子を運動量 3.5 GeV/c まで加速させていた。加速された電子と陽電子は 1 周約 3 km のトンネルの中に設置された電子蓄積リング High Energy Ring (HER) と陽電子蓄積リング Low Energy Ring (LER) にそれぞれ運ばれた後、1 点で衝突させる非対称エネルギー衝突型加速器であった。図 2.1 は KEKB 加速器の概略図である。電子・陽電子の運動量は重心エネルギーが $\Upsilon(4S)$ の質量である 10.58 GeV になるように設定されており、 $\Upsilon(4S)$ の崩壊によって B 中間子対を生成していた。

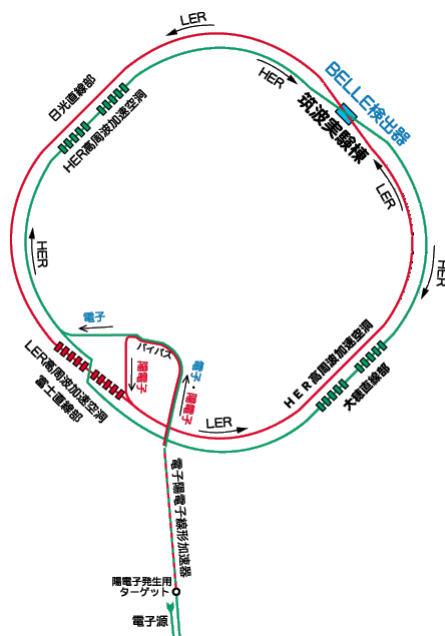


図 2.1: KEKB 加速器の概略図

B-factory 実験は、低いエネルギーではあるがより多くの崩壊事象を観測し統計をためる事で稀崩壊事象を高精度で観測する実験である。確率過程である崩壊事象がどの程度の頻度で観測できるかを定めるパラメータをルミノシティ \mathcal{L} といい、以下の関係式で与えられる。

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

R [s^{-1}] は事象の発生頻度、 σ [cm^2] は反応断面積なので、 \mathcal{L} の単位は [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] で表される。2009 年には KEKB 加速器は設計値の 2 倍の世界最高ルミノシティ $\mathcal{L} = 2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成した。この値は 1 秒間に約 20 個の B 中間子対を生成することに相当する。

ルミノシティを書き直すと以下のようになる [11]。

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

ここで γ はローレンツ因子、 e は素電荷、 r_e は古典電子半径、 I はビーム電流であり、添え字 \pm は陽電子 (+) と電子 (-) を表している。 ξ_y は beam-beam parameter と呼ばれるビームが互いに影響を及ぼす力の大きさを表しており、 β_y^* はビームサイズに起因する量である。 $R_{\mathcal{L}}$, R_{ξ_y} はルミノシティ、beam-beam parameter の減衰因子である。(2.2) よりルミノシティを増大させるには

- ビーム電流 I を増加する
- ビームサイズを絞る
- beam-beam parameter をあげる

事が挙げられる。

Belle II 実験で用いられる図 2.2 の SuperKEKB 加速器では電子を運動量 7 GeV/ c 、陽電子を運動量 4 GeV/ c まで加速させる。SuperKEKB 加速器ではビーム電流 I を増加させること、ビームサイズを KEKB 加速器の幅約 110 μm 、厚さ約 1 μm から幅約 10 μm 、厚さ約 60 nm に変更することでルミノシティを計 40 倍にする事を目標にしている。基本的なパラメータを表 2.1 に記す。

表 2.1: KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器のパラメータ

	KEKB 達成値	SuperKEKB
運動量 [GeV/ c] (LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
ξ_y	0.129/0.090	0.090/0.088
β_y^* [mm]	5.9/5.9	0.27/0.41
I [A]	1.6/1.2	3.6/2.6
\mathcal{L} [$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	2.1	80

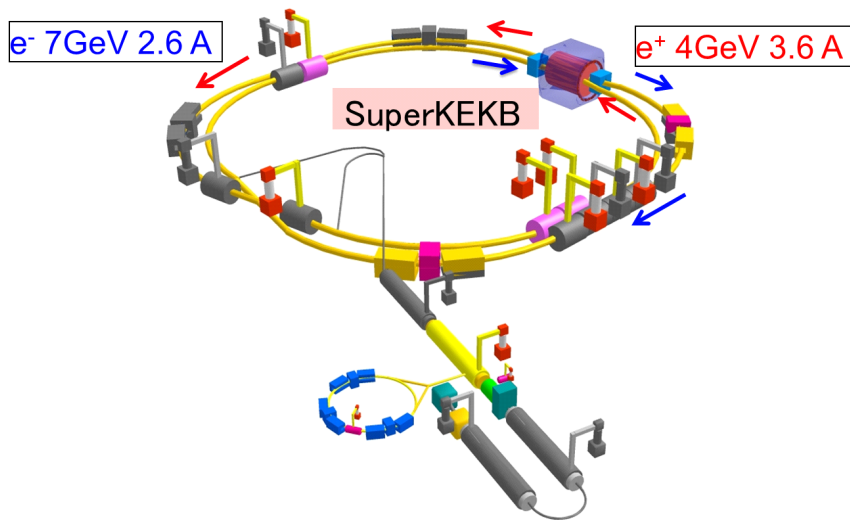


図 2.2: SuperKEKB 加速器の概略図

2.2 Belle II 検出器

図 2.3 は現在 Belle 検出器からのアップグレードが行われている Belle II 検出器の完成予定図である。Belle II 検出器は 7 種類の検出器から構成されており、中心部から順に外側に向かって粒子崩壊点検出器 (PXD・SVD), 飛跡検出・運動量測定装置 (CDC), 粒子識別装置 (TOP・Aerogel RICH), 電磁カロリメータ (ECL), K_L , μ 粒子検出器 (KLM) が図 2.4。アップグレードにあたり外側に設置されていたソレノイド磁石やリターンヨークなどの大きな構造体は Belle 検出器のものを再利用しており、内側の検出器等は新しい装置に入れ替えられる。次に Belle II 検出器の各検出器について簡単に記す。

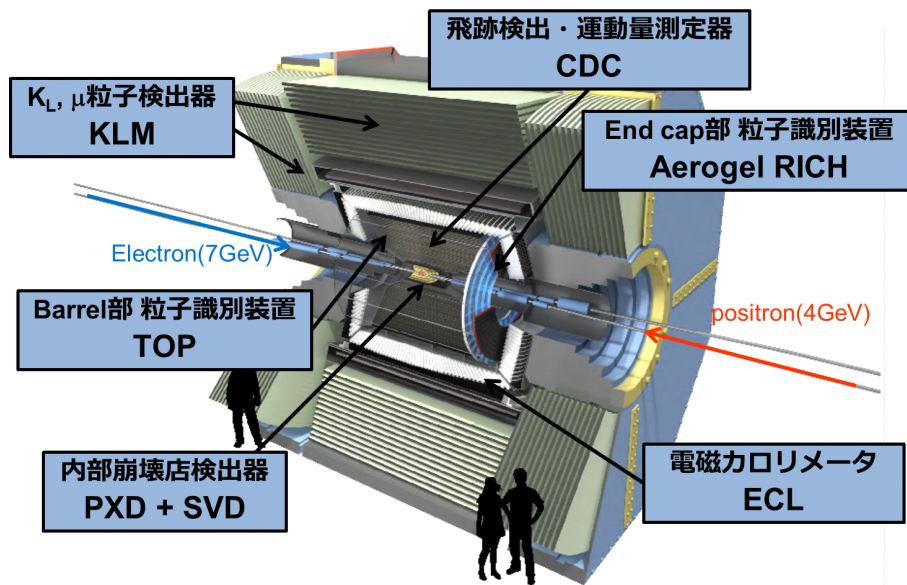


図 2.3: Belle II 検出器の完成予定図

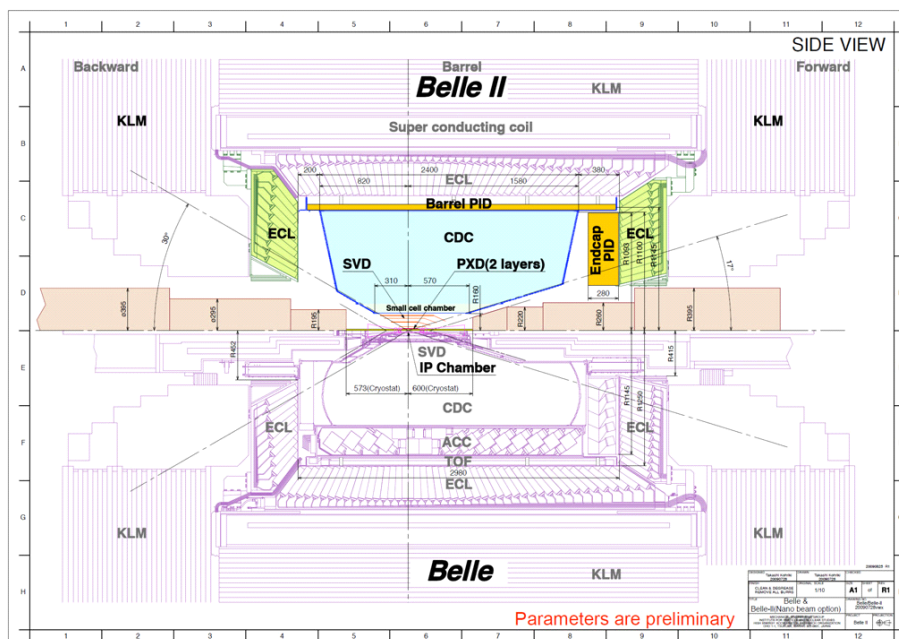


図 2.4: Belle II 検出器の配置図

上側が Belle II 検出器，下側が Belle 検出器の配置であり
内側の検出器の構造が大きく変わっている。

2.2.1 PXD, SVD

Belle II 検出器の最内層には崩壊点位置検出器である PXD(Pixel Detector) と SVD(Silicon Vertex Detector) が設置される。B 中間子の崩壊点の精密測定による崩壊時間差 Δt の決定は、CP 非対称度を測定する上で非常に重要である。Belle II 実験へのアップロードによりビームエネルギーが LER で 3.5 GeV から 4.0 GeV に、HER では 8 GeV から 7 GeV へとなったため boost factor は小さくなるため、ビームパイプの直径が 30 mm から 20 mm へと細くなる。Belle 実験では 4 層の SVD で構成されていたが、ビームパイプが細くなって空いた空間に新たに 2 層の PXD を配置することで崩壊点の測定精度向上を図る (図 2.5)。

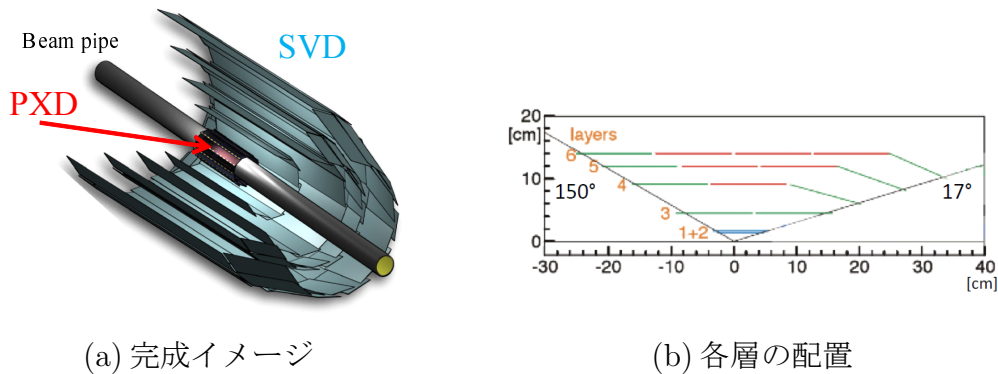


図 2.5: PXD と SVD の配置

(a) は PXD と SVD の完成イメージ。ビームパイプに近い側から 2 層の PXD, 4 層の SVD が配置されている。(b) は PXD, SVD 各層の配置。ビーム軸方向に対して $17^\circ \sim 150^\circ$ の範囲の崩壊点検出ができる。

PXD は DEPlated p-channel Field Effect Transistor(DEPFET) と呼ばれるピクセル型半導体検出器を使用する。図 2.6 は DEPFET の概略図であり、ピクセルサイズは $50 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ である。

SVD には Double Sided Si-Strip Detector(DSSD) と呼ばれる層の両面にストリップ状の検出器を直交させ取り付けた装置を用いる。中心部側はビーム軸に沿って $50 \sim 75 \mu\text{m}$, 外側にはビームパイプと直交して $160 \sim 240 \mu\text{m}$ 間隔でストリップが取り付けられている。図 2.7 は DSSD の検出原理を示した図である。層内部で発生した電子とホールがそれぞれのストリップに移動することで位置検出をおこなう。

Belle 実験と比較すると、衝突型位置検出器は層の数が PXD を導入したことにより 4 層から 6 層、内径が 1.5 cm から 1.3 cm, 外径が K_S の崩壊点検出感度を向上させるため 8 cm から 14 cm となる。図 2.8 はシミュレーションによる impact parameter の分解能を示している。Belle II は PXD のセンサー厚が $75 \mu\text{m}$, Belle II' はセンサー厚が $50 \mu\text{m}$ のタイプのものである。Belle II になることにより分解能が向上していることがわかる。

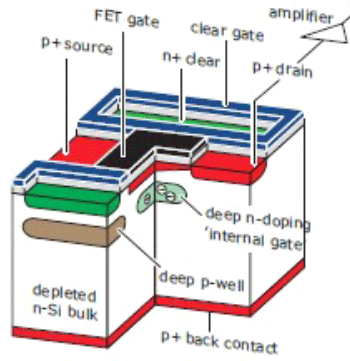


図 2.6: DEPFET の構造図

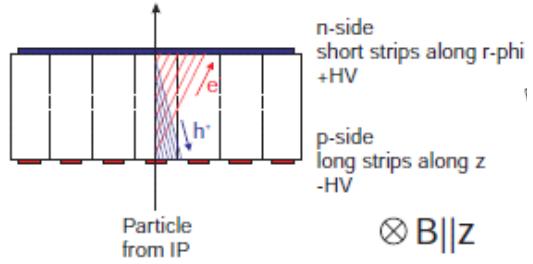


図 2.7: DSSD の検出原理

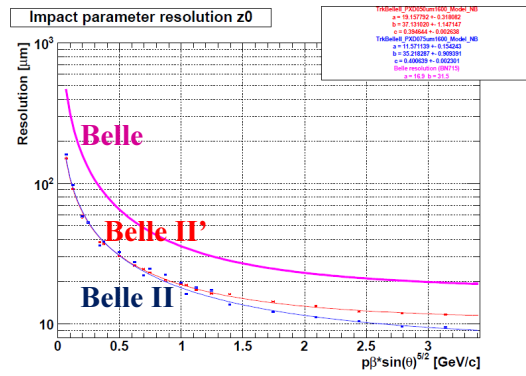
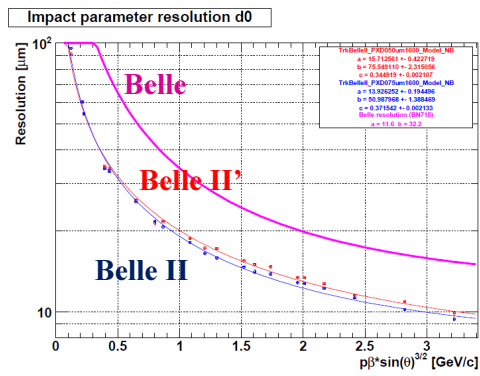


図 2.8: 運動量に対する impact parameter の分解能 (左 : r, 右 : z)
Belle II の 2 つの線は PXD の厚さが違うことに由来する。

2.2.2 CDC

SVDの外側には飛跡検出装置であるCDC(Central Drift Chamber)が設置される。この装置は50%のHeガスと50%のエタンガスが封入された内部に陰極と陽極として高電圧を印加した多数のワイヤーが設置される。荷電粒子がCDCを通過すると、ビーム軸方向に印加されている約1.5 Tの磁場によりLorenz力が加わり飛跡が湾曲するが、その運動量と曲率半径との間には以下の関係がある。

$$p = 0.3\rho B \quad (2.3)$$

ここで p は運動量[GeV/c]、 ρ は曲率半径[m]、 B は磁場[T]である。曲率半径 ρ を測定することにより運動量を測定することが出来る。

また検出される信号電圧より、荷電粒子が単位長さあたりに落としたエネルギー損失 dE/dx を測定することで、1 GeV/c以下の粒子識別をすることが可能である。図2.9は各荷電粒子の運動量と dE/dx の関係である。外側の粒子識別装置まで到達しない様な低運動量の荷電粒子でも粒子識別が可能であることがわかる。Belle

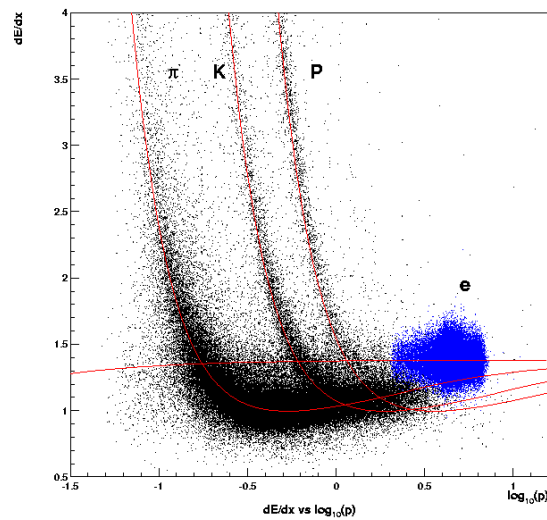


図 2.9: 運動量とエネルギー損失 dE/dx の関係

IIにアップグレードするにあたりバックグラウンドの増大に備えるため内側のワイヤーの間隔を狭くすることで、1本あたりのヒットレートを抑える。またSVDの拡大により内径が大きく、粒子識別装置の薄型化により外径が大きくなり、総ワイヤー数も増加する。これらをまとめたものが表2.2、CDCの配置図が図2.10である。

2.2.3 TOP

TOP(Time of Propagation counter)はBelle II検出器のBarrel部で通過する荷電粒子(特にK中間子と π 中間子)の粒子識別を行う装置である。この装置は荷電粒

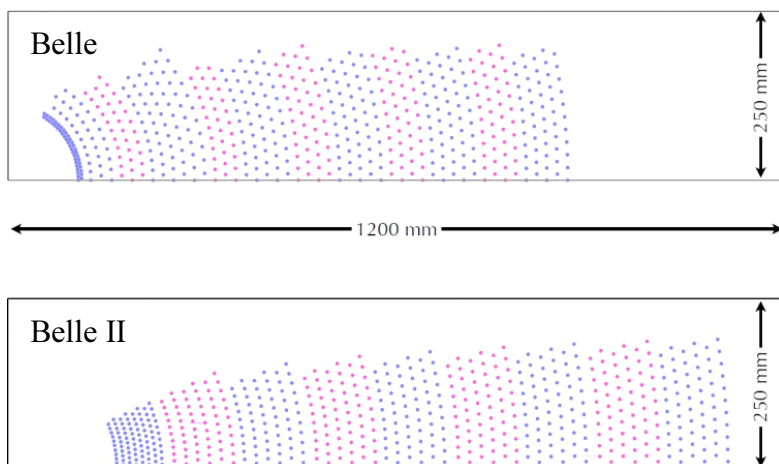


図 2.10: CDC のワイヤーの配置

表 2.2: Belle, Belle II における CDC の比較

	Belle	Belle II
内径 [mm]	88	168
外径 [mm]	863	1111.4
層の数	50	56
総ワイヤー数	8400	14336

子が物質中の光速を超えた時に発生する Cherenkov 光を捉える事で粒子識別する装置である。TOP モジュールの構造図を図 2.11 に示す。TOP モジュールは $2.6 \text{ m} \times 45 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 程のサイズの石英クォーツバーの Backward 側に MCP-PMT(Micro Channel Plate PMT)(図 2.12) を 16×2 個配置したものである。このモジュールをビームパイプを中心に 16 本配置する。

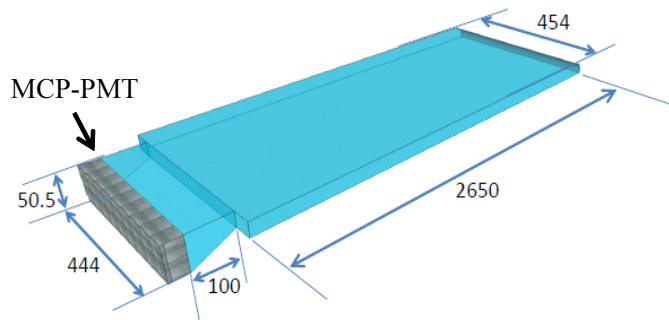


図 2.11: TOP モジュールの構造図



図 2.12: MCP-PMT

クォーツバーを通過した同じ運動量の荷電粒子は質量が大きいほど小さい放射角の Cherenkov 光を放射する。発生した Cherenkov 光は全反射を繰り返しながら MCP-PMT に到達するが、放射角が小さいほど経路長が長くなるため伝搬時間が長くなる。この伝搬時間の差と、反射により折り返されたリングの位置を測定し、リングイメージを再構成することにより粒子識別を行う (図 2.13)。しかし伝搬時間の差は 200 ps 程度と非常に短いため、MCP-PMT の時間分解能が 50 ps 未満であることが求められる。

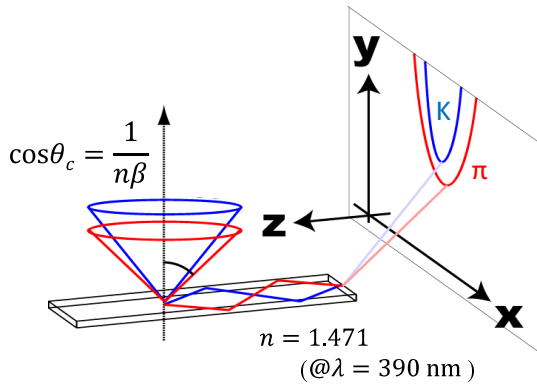
TOP では $3 \text{ GeV}/c$ 以下の運動量で 97% の K/π 識別効率を目標にしている。

2.2.4 Aerogel-RICH

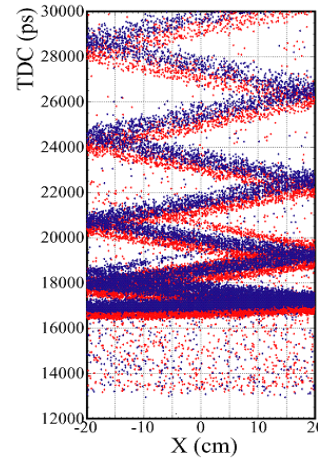
Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter(A-RICH) は Belle II 検出器の Endcap 部に位置する検出器であり、通過する荷電粒子 (特に K 中間子と π 中間子) の粒子識別を行う装置である。輻射体であるシリカエアロゲルを通過した荷電粒子から発生する cherenkov 光をリングイメージで捉え、放射角を測定することで K/π 識別を行う。詳しくは次章で述べる。

2.2.5 ECL

Electromagnetic Calorimeter(ECL) は光子と電子のエネルギーを主に測定する装置である。無機シンチレータ中を通過する光子や電子等の粒子は電磁シャワーを起こしほぼ全てのエネルギーを落とし、エネルギーに比例したシンチレーション光を出す。その光量を測定することにより落とした全エネルギーを見積もる。図 2.14 は ECL の構造図である。また落としたエネルギーやクラスタ数の情報を用い



(a) 粒子識別原理



(b) シミュレーション結果

図 2.13: (a) は測定原理図である。Cherenkov 光の伝搬時間とリングイメージを再構成することによって粒子識別を行う。(b) は 2 GeV/c, 90° で入射した K 中間子 (赤)・π 中間子 (青) の結果である。

トリガー信号を出すことや, Bhabha 散乱からの電子・陽電子を検出し衝突頻度を見積もることで (2.1) よりルミノシティを求めることが出来る。Belle II にアップ

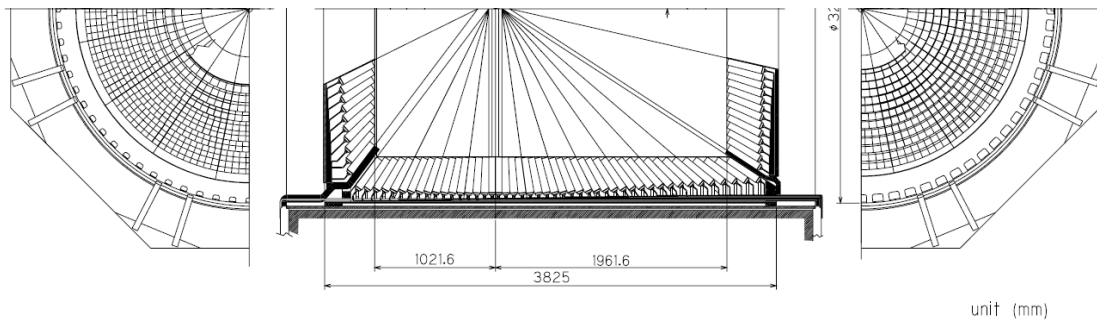


図 2.14: ECL の構造図

グレードするに当たり増加するバックグラウンドによるパイルアップが起こるため Flash ADC を用いた波形サンプリングを行うことで対応する。シンチレータには Belle と同様に発光量が多い CsI(Ti) が使用されるが, 特にバックグラウンドが多い Endcap 部ではシンチレーション時定数の短い pure CsI を使用することが計画されている。表 2.3 に ECL で使用するシンチレータの数と性能を示す。

2.2.6 KLM

KLM (K_L^0/μ detector) は Belle II 検出器最外層に設置される K_L^0 中間子と μ 粒子の識別をおこなうための装置である。chamber と鉄板が Barrel 部で 15 層 + 14 層,

表 2.3: ECL で用いられるシンチレータの種類と数

	材質	シンチレータ数
Barrel	CsI(Ti)	6624
Endcap(forward)	pure CsI	1152
(backward)	CsI(Ti)	960

Endcap 部で 14 層 + 14 層交互に積み重なった構造をしている。 μ 粒子は π 中間子と質量が近い (μ : 105 MeV, π : 140 MeV), 前述の粒子識別装置のみでは識別が難しい。しかし μ 粒子は長寿命で透過性が高く KLM の鉄層を貫通するため、チェンバーで飛跡を検出することで識別する。

中性粒子である K_L^0 中間子は電磁相互作用を起こさないが、ECL や KLM 中で hadronic interaction を起こしハドロンシャワーを発生するので K_L^0 中間子の飛来方向を検出することが出来る。

Belle では Resistive Plate Chamber(RPC) を 2 層重ねた Super Layer を使用した。図 2.15 は Super Layer の構成である。RPC は 2 枚の高電圧を印加した絶縁ガラス板間にガスを封入し、そこに荷電粒子が通過するとストリーマ放電が起きその信号を読み取ることにより検出する。しかし再び充電するまでに約 2 秒かかってしまうため、Belle II では特にバックグラウンドが増加する Endcap 部の RPC をシンチレータを用いたシステムに変更する。図 2.16 はシンチレータを用いた構成である。75 本のストリップ状のシンチレータが並んでいる構造であり、荷電粒子のシンチレーション光をシンチレータ中心部に内蔵された波長変換ファイバーにより青色領域から緑色領域に変換し一端に設置された Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)[12] で読み取る。

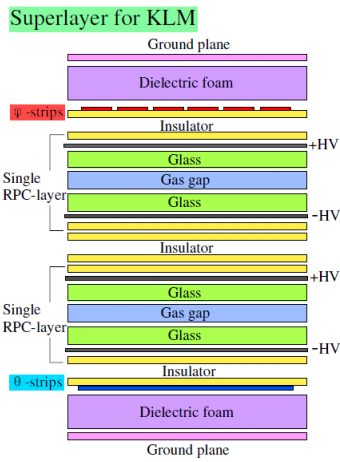
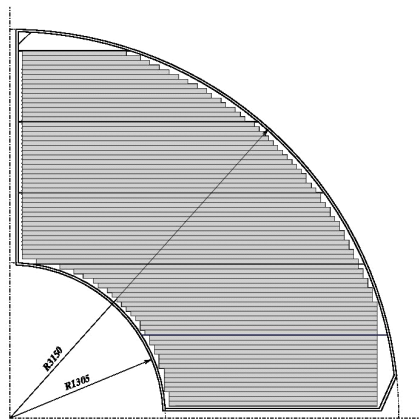
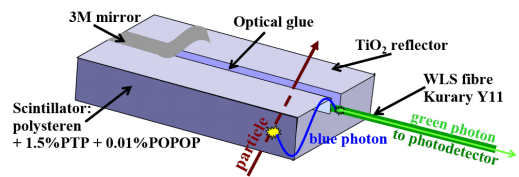


図 2.15: RPC2 層の super layer。ストリップ状のカソードで読み出し各層で x, y 方向の位置検出を行う。



(a) ストリップ状シンチレータの配置



(b) 1 ストリップの構造

図 2.16: (a) はストリップ状シンチレータの配置図。75 本のシンチレータが並んでいる。90° 回転させたものと 2 層にすることにより位置検出を行う。(b) は 1 ストリップの構造。シンチレータ中心部に波長変換ファイバーが内蔵されている。

3 Aerogel-RICHの原理

Aerogel Ring Imaging Cherenkov Counter(A-RICH)はEndcap部の粒子識別装置であり、主目的がK中間子と π 中間子の識別(K/ π 識別)である。また、Belle実験で用いられたAerogel Cherenkov Counter(ACC)から大きく変更された検出器である。ACCはBelle実験の目的であるCP対称性の破れ観測のため $0.5 \text{ GeV}/c < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ の低運動量領域に特化していた。Belle II実験では新しい物理を観測するため高運動量領域にも感度を持ったK/ π 識別装置が必要であるためA-RICHが採用された。本章ではA-RICHの検出原理と開発状況について説明する。

3.1 検出原理

3.1.1 Cherenkov光発生原理

A-RICH, ACCは共にCherenkov光を用いて粒子識別をする装置である。荷電粒子が屈折率 n の物質中をその物質中の光速 c/n より大きい速度で通過する時、荷電粒子によって物質中の電場が乱され偏極する。偏極された電子が平衡状態に戻る時に放射する光子がCherenkov光である。この様にして発生したCherenkov光は図3.1の様に荷電粒子の進行方向に対して角度 θ_c の方向に放射される。Cherenkov光が放射される条件は $\beta = v/c$ として

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (3.1)$$

となる。屈折率と放射角の関係は

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (3.2)$$

となり、進行方向に対して円錐状に放射される。また、発生する光子数 N は以下の式によってあらわされる。

$$N = 2\pi\alpha L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sin^2 \theta_c}{\lambda^2} d\lambda \quad (3.3)$$

ここで α は微細構造定数、 L は荷電粒子が物質を通過した距離、 λ は発生したCherenkov光の波長である。通過する粒子の運動量 p は

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3.4)$$

である。

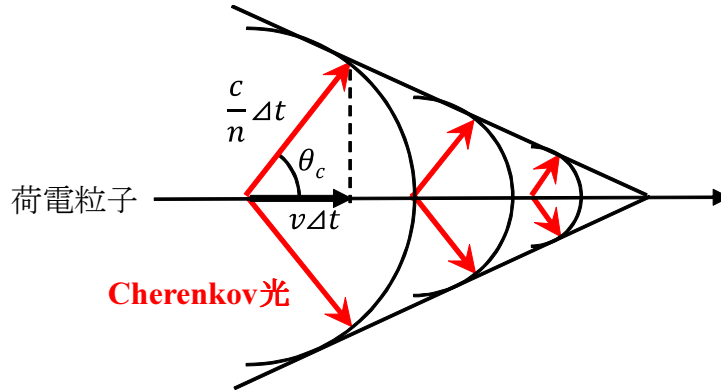


図 3.1: Cherenkov 光の発生原理

3.1.2 ACC 検出原理

(3.4) に Cherenkov 光が放射される条件式 (3.1) を代入すると閾値運動量 p_{th} は

$$p_{th} > \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3.5)$$

となる。これは運動量における Cherenkov 光の放射条件を表しており、放射条件は粒子の質量 m によって異なることがわかる。この条件式を用いて粒子識別するのが Belle 実験で使われた ACC である。図 3.2 は (3.5) から求めた K 中間子, π 中間子の屈折率 n と閾値運動量 p_{th} の関係を示したグラフである。閾値運動量 p_{th} より大きい運動量で屈折率 n の物質中を通過した際 Cherenkov 光を放射する。K 中間子, π 中間子の閾値運動量 p_{th} の違いにより粒子を識別する装置が Belle 実験で採用された ACC である。

図 3.3 は ACC のモジュールの構造である。Barrel 部と Endcap 部で構造が異なっているが検出する原理は同じであり、輻射体にシリカエアロゲル、光検出器にファインメッシュ型の光電子増倍管が用いられた。屈折率の異なるシリカエアロゲルを用いることで検出できる運動量領域を変化させることが出来、屈折率は Barrel 部で 1.010~1.028, Endcap 部では 1.030 を採用した。この時 Endcap 部 ACC での識別可能な運動量領域は $0.5 \text{ GeV}/c < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ である。Endcap 部でこのような運動量に設定したのは Flavour tagging に特化させるためである。

図 3.4 は Belle 実験のデータ、およびモンテカルロシミュレーションによる K 中間子の検出効率と π 中間子による誤識別率である [13]。高い運動量領域では K 中間子の検出効率が下がっているのがわかる。K/ π の誤識別率は 10% 程度である。

しかし Belle II 実験では新しい物理の観測や精度の高い CP 非対称度の測定のため、識別効率の向上と広い運動量領域での運用が求められる。そこで閾値運動量による K/ π 識別ではなく Cherenkov 光のリングイメージによる K/ π 識別を採用する。これが A-RICH である。

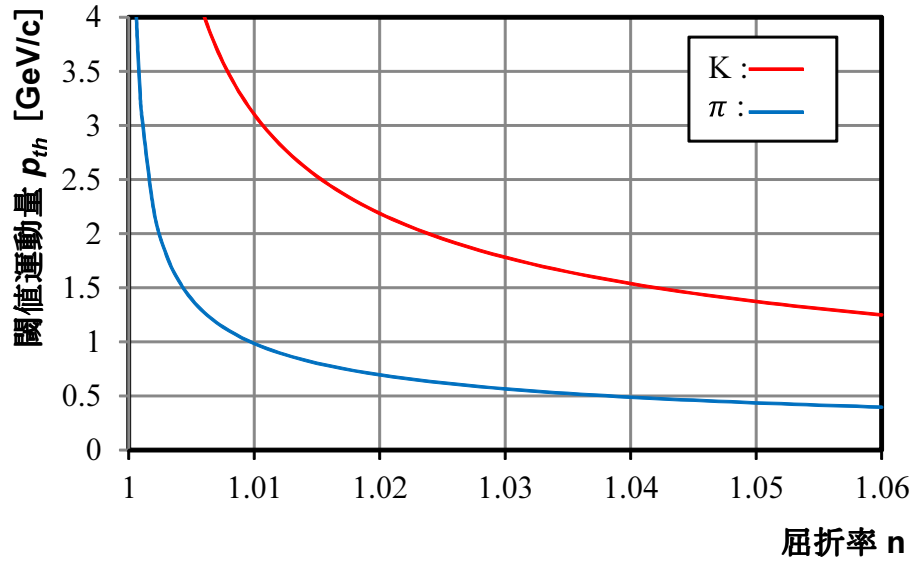
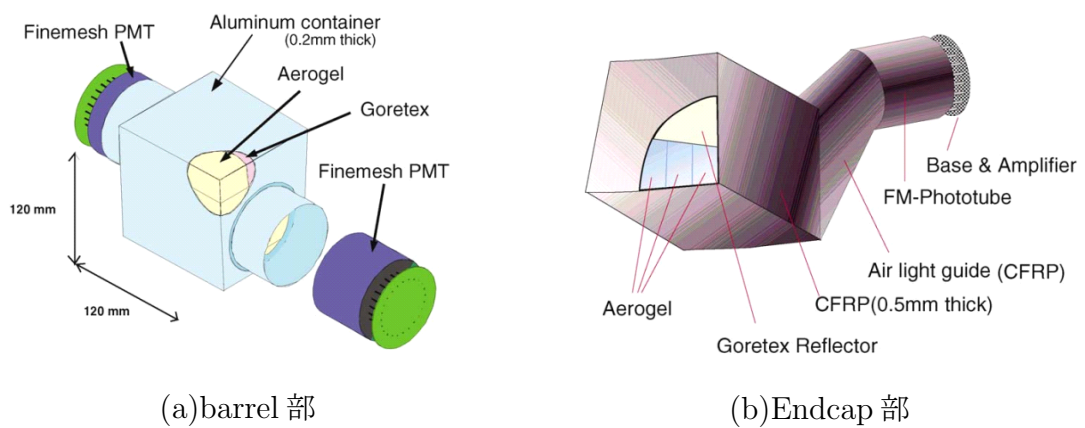


図 3.2: 屈折率と閾値運動量の関係



(a) barrel 部

(b) Endcap 部

図 3.3: Barrel 部, Endcap 部の ACC モジュール

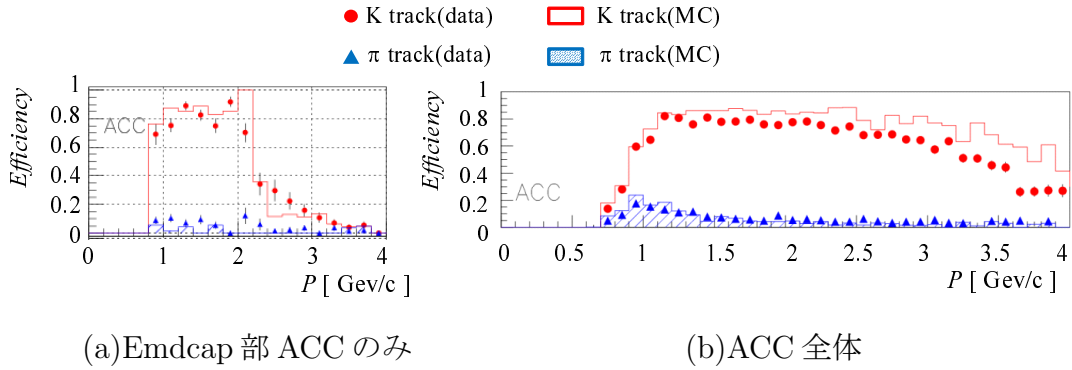


図 3.4: Belle 実験のデータ, およびモンテカルロシミュレーションによる K 中間子の検出効率と π 中間子による誤識別率

(a) は Endcap 部のみの結果。2 GeV/c 以上で識別効率が著しく低下している。(b) は ACC 全体の結果である。

3.1.3 A-RICH 検出原理

(3.4) に屈折率と放射角の関係式 (3.2) を代入すると

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1} \quad (3.6)$$

を得る。この式より輻射体であるシリカエアロゲルを通過する荷電粒子からの Cherenkov 光が作るリングイメージからの情報を用い, 粒子識別をする装置が Belle II 実験で採用される A-RICH である。(3.6) の内, 変数は輻射 HAPD 体の屈折率 n , 荷電粒子の運動量 p , Cherenkov 光放射角 θ_c である。 n はシリカエアロゲルの調整により既知, p は CDC での測定により求めることが出来るためリング状に放射された放射光の半径 r を測定することにより θ_c を求め通過した荷電粒子を識別することが出来る。図 3.5 は A-RICH における粒子識別の概略図である。

A-RICH の性能を決めるうえで重要なのは 1 トラックあたりの角度分解能 σ_{track} である。 σ_{track} は以下の様に表示される。

$$\sigma_{track} = \frac{\sigma_{single}}{\sqrt{N_{p.e.}}} \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (3.7)$$

ここで σ_{single} は 1 光子あたりの角度分解能, $N_{p.e.}$ は平均検出光子数, d は輻射体の厚さである。輻射体の厚さを厚くすることで $N_{p.e.}$ は増加するが, σ_{single} は悪化してしまう。これは Cherenkov 光の放射位置の不定性が輻射体の厚さの分大きくなってしまったためである。輻射体の厚さは 20 mm 程度に最適値があることがわかっている [14]。

そこで放射点の不定性を大きくせずに検出光子数を増加させるため, 屈折率の違う輻射体を複数枚重ねる方法を採用した。図 3.6 は単層, 複層の輻射体による

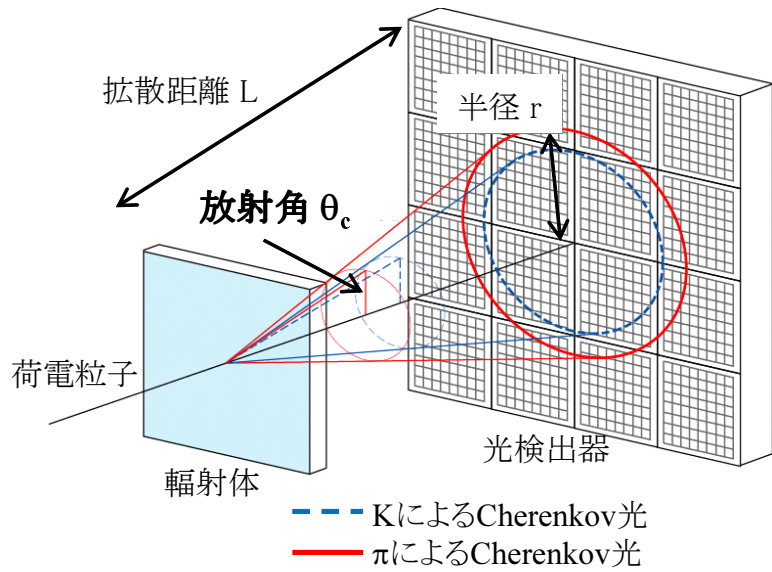


図 3.5: k/π 粒子識別の概略図

Cherenkov 放射の概念図である。下流側の輻射体の屈折率を上流側に比べて少し小さくしている。

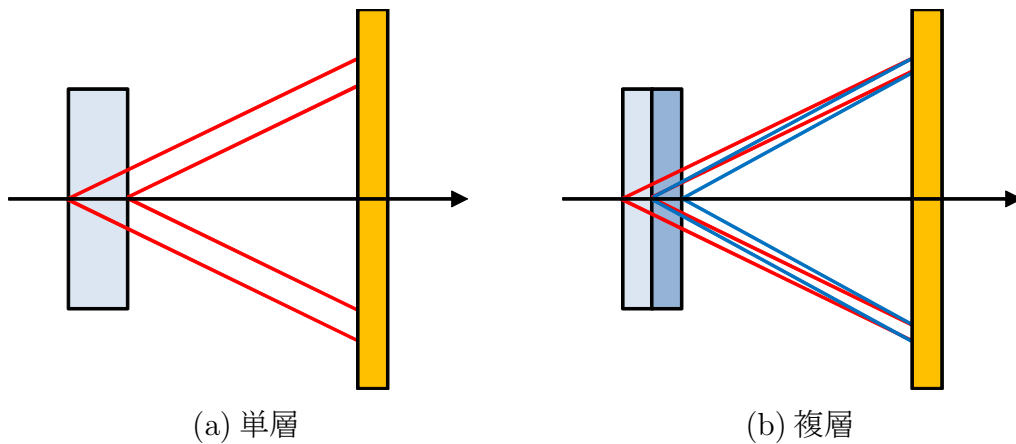


図 3.6: 単層, 複層の輻射体による Cherenkov 放射の概念図

目的としている K 中間子と π 中間子の放射角 θ_c は, $p = 4 \text{ GeV}/c$, $n = 1.05$ の時, K 中間子は 285 mrad , π 中間子は 308 mrad である。放射角度差は 23 mrad となり, 距離 $L = 20 \text{ cm}$ で放射光の半径の差は約 5 mm である。したがって位置分解能は 5 mm 以下であることが望まれる。

3.2 A-RICHの構造

A-RICHは輻射体としてシリカエアロゲル、光検出器はHybrid Avalanche photo detector(HAPD)、光検出器の読み出しシステムで構成される。図3.7はA-RICHの完成イメージである。本節では各構成要素の現状について記述する。

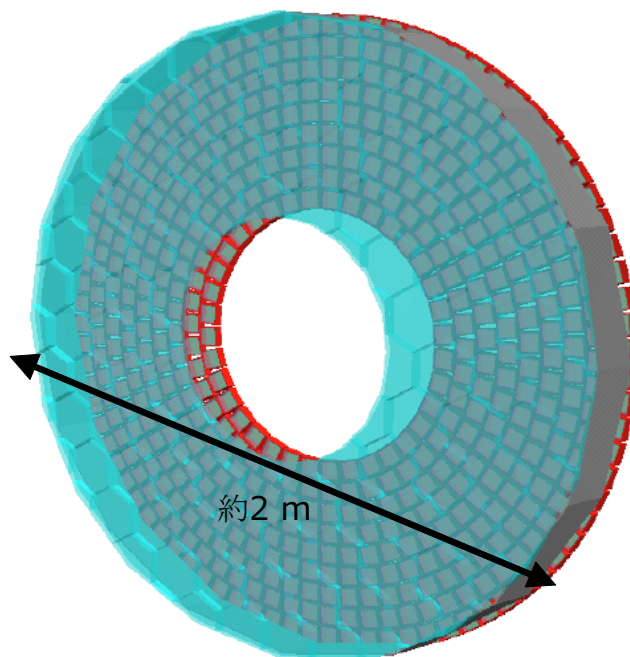


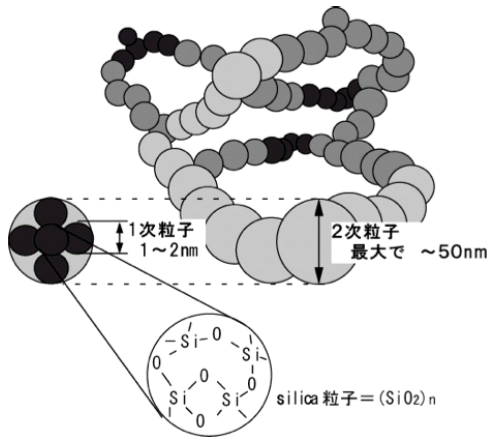
図 3.7: A-RICH 完成イメージ

青色の部分シリカエアロゲル、赤色の部分が HAPD、緑色の部分が読み出しシステムとなっている。

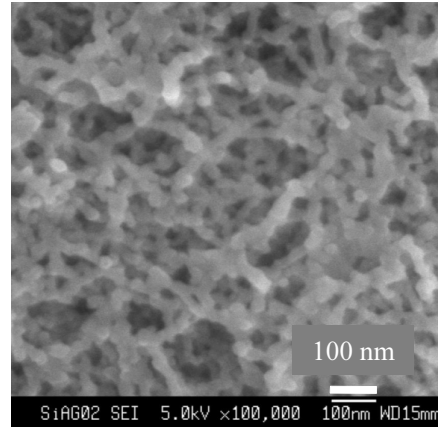
3.2.1 シリカエアロゲル

シリカエアロゲルはナノサイズのシリカ (SiO_2) 粒子が結合し3次元的なクラスター構造をしている物質であり、Belle ACCでも用いられた。3次元的なクラスター構造をしているため多孔質で典型的には体積の90%以上が空気で占められている状態である。図3.8はシリカエアロゲルの構造である。図3.8(b)より高空隙率であることがわかる。2次粒子でも最大で50 nmと可視光の波長(400~700 nm)と比べると十分に小さい。このような構造によりシリカエアロゲルは固体でありながら低屈折率、低密度、高透明度を実現することが可能である。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した。また密度を変えることにより屈折率を調整できることも特徴の一つである。A-RICHでは屈折率1.04~1.06のシリカエアロゲルを使用する。

シリカエアロゲルの開発要素は主に



(a) シリカエアロゲルの構造



(b) シリカエアロゲルの拡大図

図 3.8: シリカエアロゲルの構造と拡大図

表 3.1: 代表的な輻射体物質の物性値

物質	屈折率	密度 g/cm ³	その他
シリカエアロゲル	1.007~1.2	0.028~	
ガラス	1.48~2.00	2.4~2.6	光学ガラスなど
水	1.3428	0.99984	20 °C
空気	1.00028	0.001293	25 °C, 1atm

- タイルごとの屈折率のばらつきを抑えるために屈折率の制御
- タイルを通過する光子を増加させるために透明度の向上
- タイル内での屈折率一様性の向上
- 輻射体境界を減らすためにタイルの大型化

の4点である。これまで A-RICH で使用する高屈折率で高透過長のシリカエアロゲルの作成は困難であったが「Pinhole-drying(PD) 法」と言う乾燥法を用いることで可能となった [15]。PD 法とはエアロゲル原料(ウェットゲル)を乾燥させる際、小さな穴(ピンホール)を開けた容器に入れゆっくりと乾燥させる方法である。この方法により時間をかけてウェットゲルを乾燥させることにより、内部構造を破壊せずに縮ませて密度を高めることで屈折率を高くすることが可能になった。従来の製法では、 $n = 1.05$ 付近では光の透過長は 50 mm 程度が限界であったが、PD 法により $n = 1.06$ 付近で 60 mm 程度まで向上させることができる [15]。また PD 法による屈折率 1.059 の大型シリカエアロゲルの作成に成功している (図 3.9)。



図 3.9: Pin-drying 製法により作成したシリカエアロゲル。
 $16.8 \times 16.8 \times 2 \text{ cm}^3$ クラックフリーのシリカエアロゲルの作成に成功した。

3.2.2 光検出器

Aerogel の屈折率を 1.05、荷電粒子運動量を $4 \text{ GeV}/c$ とした場合、 π 中間子と K 中間子とのリング半径の差は約 5 mm となるので光検出器にはこの差を検出できる位置分解能が必要である。また 2 次元的にリングイメージを捉える為に、1 光子検出が可能、さらに検出器の光電面に垂直に 1.5 T 程度の磁場中での動作が可能であることが求められる。これらの要求を満たす A-RICH 用の光検出器として現

在 144ch マルチアノード型 HAPD の開発を，浜松ホトニクス（株）と共同で行っている。図 3.10 に HAPD の外観と寸法図を示す。

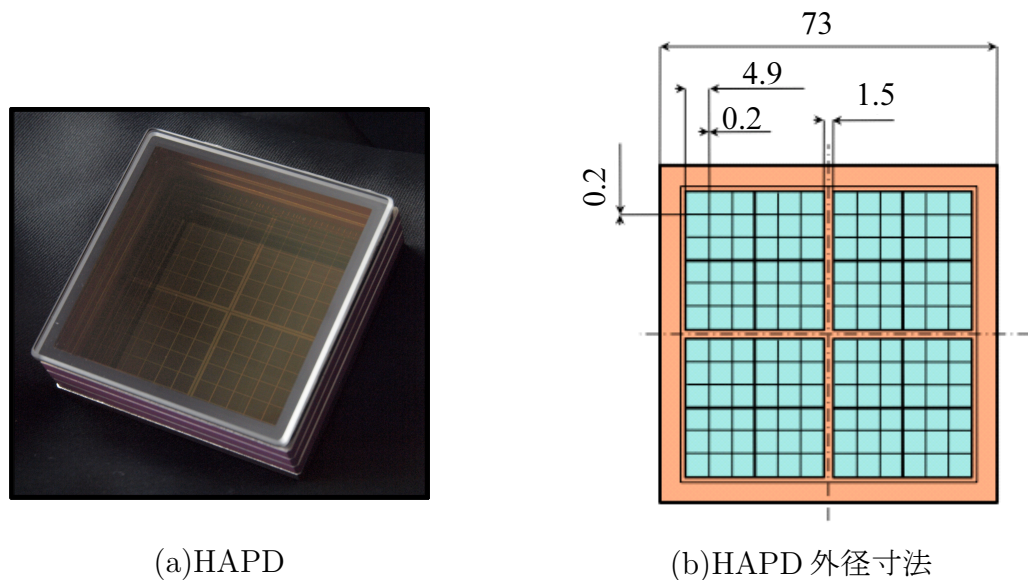


図 3.10: 光検出器 HAPD と寸法図

HAPD の構造と増幅原理を図 3.11 に示す。HAPD の構造としては，高電圧が印加できる真空管内部にピクセル化された Avalanche Photo Diode (APD) が内蔵されている (同図 (a))。表 3.2 に現在開発を進めている HAPD の仕様をまとめる。1ch あたりのピクセルサイズは約 $4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$ であり位置分解能は $4.9/\sqrt{12} \text{ mm}$ となるため十分な精度を満たしている。

HAPD の光電子の増幅原理を以下に記述する。

1. 光電面に光子が入射すると光電効果により光電子を放出する。
2. 放出された光電子は $-7 \sim -8.5 \text{ kV}$ 印加された真空管部分で加速され APD に入射する (図 3.11(a))。
3. APD に入射された光電子はエネルギーを落として停止するが，この時平均 3.6 eV で電子正孔対が生成される。この段階での増幅率 (電子打ち込み増幅) は $\mathcal{O}(10^3)$ である。
4. 生成された電子正孔対は APD に印加された逆バイアスにより正孔は P 層側に，電子は N 層側に移動する。移動時に Avalanche 増幅領域を通過した際 APD 中の電子を励起させ新たな電子正孔対を生成する。新たな電子正孔対がまた新たな電子正孔対を作りという過程を繰り返し雪崩式に増幅していく (図 3.11(b))。この過程を Avalanche 増幅と呼び増幅率は $\mathcal{O}(10)$ である。

表 3.2: 144ch マルチアノード HAPD の仕様

外寸 内蔵 APD	印加 (Bias) 電圧 Avalanche 増幅率 チップ数 ピクセル数/チップ ピクセルサイズ 有効面積	$73 \times 73 \text{ mm}^2$ ~ 400 V $G_{\text{Ava}} \sim 50$ 4 36 $4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$ ~ 65 %
入射窓	材質 厚さ	合成石英 3 ~ 4 mm
光電陰極面	印加 (電子打ち込み) 電圧 打ち込み増幅率 材質 QE	~ -8,500 V ~ 1900 Bialkali(→ Super-Bialkali) ~ 30 %
最終増幅率 層チャンネル数 検出器容量 S/N 比		$G_{\text{Tot}} = \mathcal{O}(10^4)$ 144 ch 80 pF ~ 15

HAPD は電子打ち込み増幅と Avalanche 増幅の 2 種類の増幅機構により最終的に $\mathcal{O}(10^4)$ の増幅率が可能である。HAPD は増幅段階の初段増幅である電子打ち込み増幅が高く、電子数の統計的揺らぎが小さいため 1 光子検出性能に優れている。磁場と電場が並行の場合、光電子の電場加速効果は影響を受けないことが確かめられており [20], APD の動作原理から磁場の影響は受けないと考えられるので、HAPD は磁場中でも動作可能である。

3.2.3 読み出しシステム

フロントエンド部

A-RICH の信号読み出しシステムに要求される性能には次の点があげられる。まずシステムの集積化である。図 3.12 は A-RICH の設置空間の概略図であり A-RICH はビーム軸方向に対して 280 mm 以下の空間に設置しなければならず、その中に輻射体・Cherenkov 光拡大空間・HAPD・読み出し回路すべてを設置しなければならない。読み出しシステムに許容される空間は 50 mm のみで、その中にケーブル等を含む全てのシステムをこの領域に収める必要がある。また、HAPD の増幅率は $\mathcal{O}(10^4)$ と一般的な光電子増倍管 (増幅率 $\mathcal{O}(10^7)$) と比較すると小さいので高い S/N 比を実現するためには低雑音の増幅器が必要である。さらに HAPD1 台につ

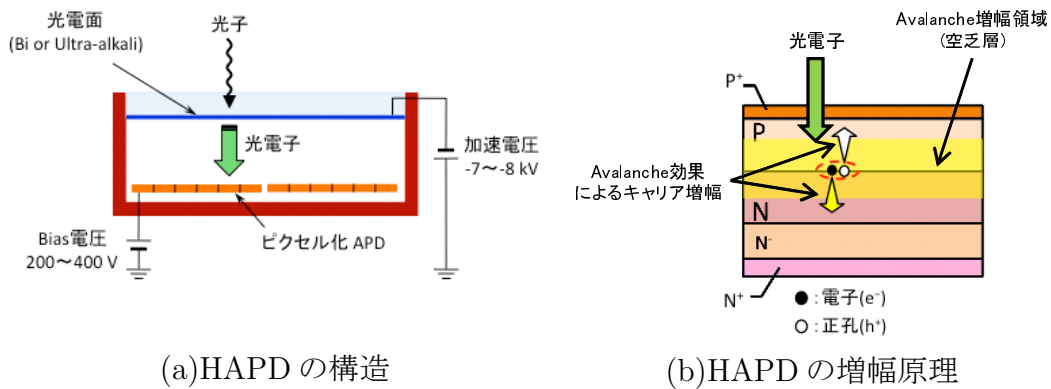


図 3.11: HAPD の増幅原理

き 144ch あり全体で 420 台の HAPD を使用する予定であるので合計約 60,000ch の同時読み出しが必要である。

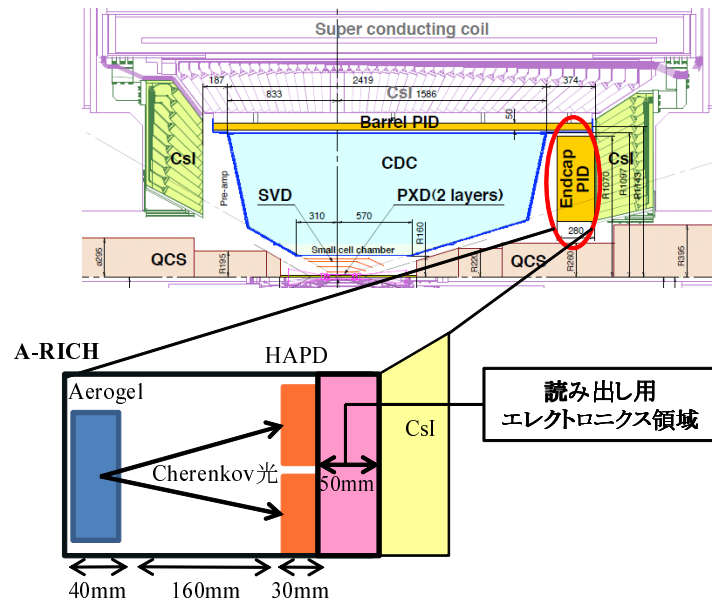


図 3.12: A-RICH の設置空間

読み出し用エレクトロニクスは 50 mm 以下の領域に納めなければならない。

以上よりフロントエンドの読み出し電子回路に要求される点は次のとおりである。

- システムの集積化 - ケーブルなども含めビーム軸方向に 50 mm 以下
- 高利得・低雑音のアンプ機能
- 多チャンネル同時読み出し

これらの要求を満たすために我々は読み出しシステムに ASIC (Application Specific Integrated Circuit) と FPGA (Field Programmable Gate Array) を使用する。

ASIC は特定の用途向けに複数の機能を一つにまとめた集積回路で A-RICH 用に個別に設計することにより高集積化が可能であり、かつ高速動作に向いている。FPGA は実装後にもプログラミングによって回路設計ができるため Belle II の DAQ システムにも柔軟に対応できる。

読み出しシステムの信号処理の流れを図 3.13 に示す。A-RICH の信号読み出しの際に必要なのはリングイメージを捉えるための位置情報であり、波高値等の情報は必要なく光子検出の有無というビット情報のみが必要である。HAPD からの信号を前置増幅器によって増幅、波形整形器で波形立ち上がり時間である shaping time を調節し、信号を判別しやすいように調節したのち比較器に送られる。比較器では与えられた閾値電圧 V_{th} より波高値が高ければヒットとみなしデジタル値の検出信号を出力する。比較器から出力されたデジタル信号は FPGA 内のシフトレジスタにクロックのタイミングで記録され、トリガー信号が入力されると 4 クロック分の情報が出力される。この 4 クロック分の情報のうち 1 クロックでもヒット信号が出力されている場合は 1 光子検出とみなしている。また FPGA によって ASIC の制御を行っている。この様にアナログ処理を ASIC、デジタル処理を FPGA が担当することでノイズの一因であるアナログデジタル混在を避けている。2007 年より A-RICH 専用の ASIC として「SA シリーズ」の開発が行われている。

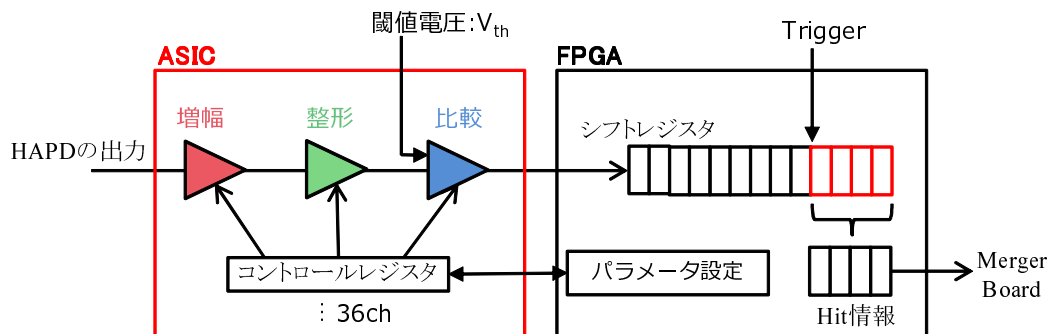


図 3.13: HAPD からの信号処理

中継システム

Belle II 実験ではデータ収集に Belle2Link という全体で統一したデータ収集システムを使うことが決定している [11]。そこで現在 Belle2Link に対応させるため Merger Board を開発している。図 3.14 は Merger Board の概念図である。Merger Board は複数台のフロントエンドボード (FE ボード) からのデジタル信号を Merger Board 上の FPGA でデータ圧縮し Belle2Link に送るためのものである。Merger Board によってデータ量の圧縮とケーブル数を少なくすることが出来る。

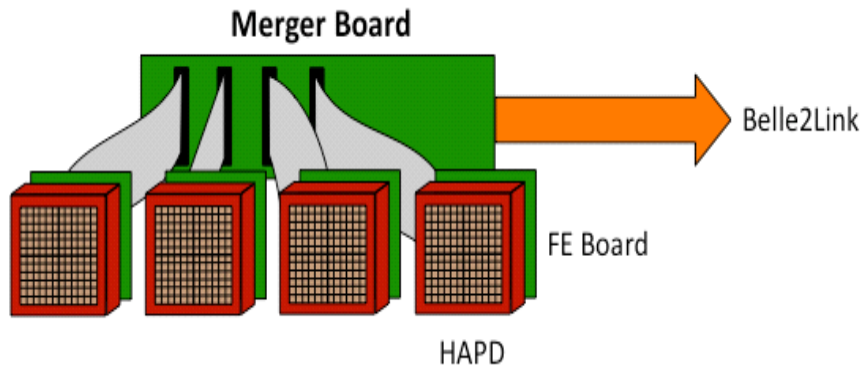


図 3.14: Merger Board の概念図

3.3 A-RICH の性能評価

A-RICH の性能評価のため、2009 年 11 月に KEK の富士テストビームラインを利用して電子ビームテストが行われた [22]。このビームテストでは HAPD を 6 台、読み出しシステムとして SA シリーズの第 1 バージョンである SA01 を搭載した読み出しボードを用いて行われた。このビームテストでのセットアップは図 3.15 である。2.0 GeV/c の電子ビームを用いて測定した際の全トラックのヒット分布を積算して得られたリングイメージが図 3.16 である。A-RICH では 4σ の精度での K/ π 識別を目指しているが、このビームテストにおいて 6.67σ の精度で K/ π 識別ができ、目標値以上の性能を達成できることが分かった。

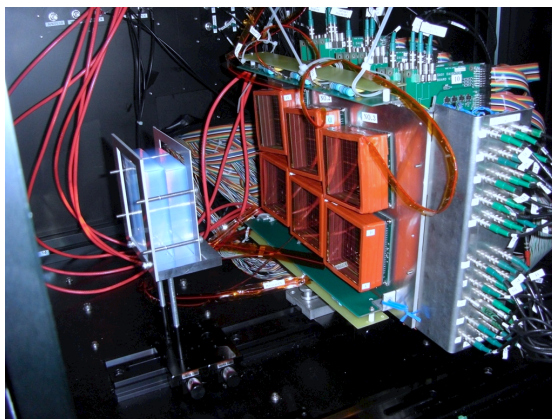


図 3.15: ビームテストのセットアップ

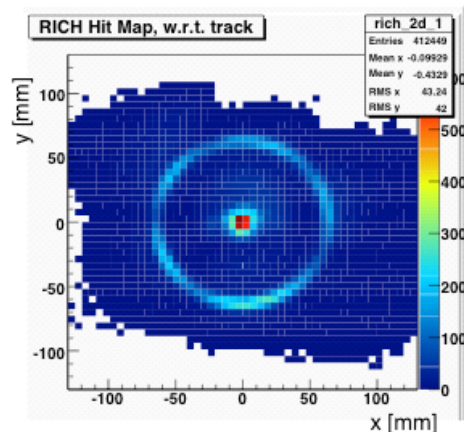


図 3.16: 積算リングイメージ

3.4 A-RICH 開発における課題

この節では A-RICH 開発における現状と本論文で報告する課題について説明する。

3.4.1 HAPD の放射線耐性

Belle II 実験では電子・陽電子衝突反応以外にビームパイプ内で起こる Touschek 散乱, Radiative Bhabha 散乱等によってガンマ線が発生しビームパイプや衝突点近傍の QCS マグネット等の構造物に当たることで2次放射線としてガンマ線, 中性子を叩きだし飛来することが分かっている。この放射線によって HAPD 内部に損傷が生じ Avalanche 増幅率の低下, リーク電流の増加等が起こる。Belle II 実験の稼働予定期間である 10 年間の使用に耐えるため中性子, ガンマ線による HAPD への影響の研究がなされ, それぞれ対策が考えられた。今回中性子, ガンマ線両方の対策が施された最終版候補の HAPD を作成し中性子照射試験, ガンマ線照射試験を実施した。

第 4, 5 章では中性子, ガンマ線による HAPD の損傷と照射試験の結果を報告, 最終版 HAPD について報告する。

3.4.2 読み出しボードの開発

SA シリーズでは第 1, 第 2 バージョンとして SA01, SA02 を製作し基本的な性能を満たすことを確認した。そこで最終バージョンとして SA03 を製作した。SA03 では Belle II 実験中に飛来する放射線対策のため非破壊読み出し機能の搭載と SA02 と比較して Shaping time の短縮を行った。読み出しボードも同様に SA01, SA02 用のボードが製作製作されており性能測定が行われてきた。

第 6 章では最終版 ASIC SA03 の性能評価と SA02 用の読み出しボードに SA03 を搭載したボードの評価結果を報告する。

4 HAPDの放射線耐性

Belle II 実験は2016年の実験開始から10年間の稼働を予定している。Belle II 実験では電子・陽電子ビーム中での Touschek 散乱, Radiative Bhabha 散乱といった効果によりガンマ線や中性子等の放射線が発生する。これらの放射線はバックグラウンドとして検出効率に影響を与えるのみではなく、検出器そのものに損傷を与え検出効率の低下や誤作動の原因となる。Belle II 検出器の Endcap 部で使用する A-RICH 検出器は中性子が年間 10^{11} neutrons/cm², ガンマ線が年間 100 Gy と予想される厳しい放射線環境下に置かれることになる。そこでシリカエアロゲル, HAPD, 読み出しエレクトロニクスそれぞれに Belle II 実験環境下の放射線耐性評価が行われている [23]。HAPD は特に半導体でできている APD が放射線により劣化する。A-RICH では主に中性子とガンマ線が問題視されており、それぞれについて HAPD の耐性評価, 対策が取られてきた。HAPD は放射線による劣化後でも S/N 比 7 程度以上で読み出すことを目標にしている。

本章では中性子, ガンマ線の発生メカニズムと HAPD に与える影響, 耐性向上のために取られた対策について説明する。

4.1 中性子の影響と対策

4.1.1 中性子発生原理と影響

中性子は衝突点付近からではなくビームパイプ等から飛来する。図 4.1 は中性子発生イメージである。右 diagram の様な電子・陽電子散乱である Radiative Bhabha 散乱がビーム中で生じガンマ線が発生する。発生したガンマ線はビームパイプ等の構造体と相互作用を起こし中性子をたたき出す。また、ビーム中の粒子同士が衝突する Touschek 散乱により軌道を外れた粒子がビームパイプに衝突しシャワーを起こすことで中性子が発生することも予想されている。

Belle II 実験で飛来する中性子数は Belle 実験での結果から見積もられた。Belle 実験稼働時に Endcap 部に取り付けた Photo diode のリーク電流の増加量から見積もった Belle 実験での中性子量は年間 1×10^{10} n/cm² である。この値にルミノシティ向上による中性子量増加を見込んだ値として Belle II 実験では 10 年間で 1×10^{12} n/cm² と見積もられた [21]。後述する東海村原子炉「弥生」における照射試験ではこの値を Belle II 実験 10 年分として中性子照射を行った。しかしその後のシミュレーションにより Belle II 実験において飛来する中性子数は 1 MeV の中性子に換算して年間 1×10^{11} n/cm² であると予想されている。東海村原子炉「弥生」の中性子エネルギースペクトルは図 4.2 であり、1 MeV の中性子に換算すると

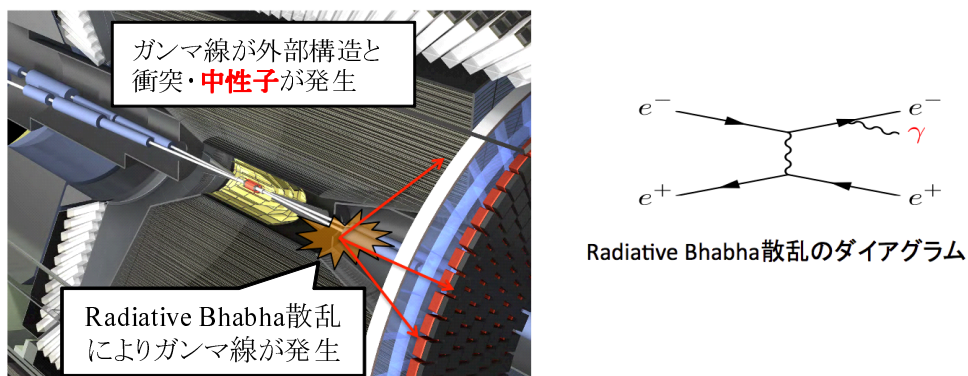


図 4.1: 中性子発生イメージ

Radiative Bhabha 散乱によって発生したガンマ線がビームパイプ等と相互作用を起こし中性子をたたき出す。右図は最低次の Radiative Bhabha 散乱の diagram

$4 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ となり、最大でも Belle II 実験 4 年分の照射しか行われていない。そのため Belle II 実験 10 年分の照射量である最大 10^{12} n/cm^2 の中性子耐性を確認しなければならない。なお以後表記する中性子量は 1 MeV の中性子に換算した値である。

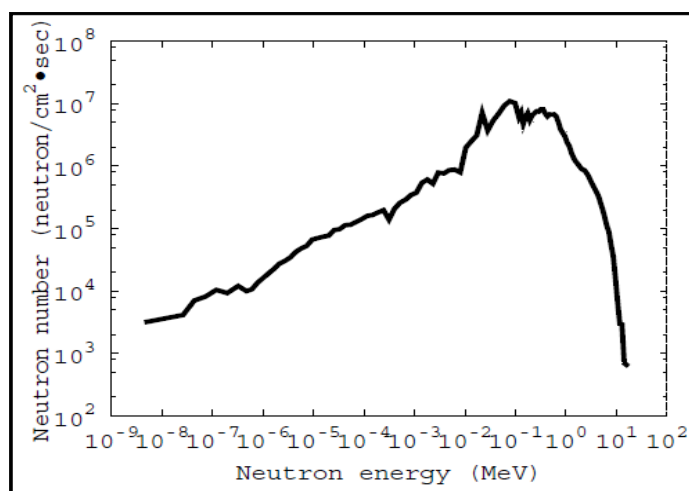


図 4.2: 東海村原子炉「弥生」の中性子エネルギースペクトル

これらの中性子が HAPD に飛来すると APD 部において Frenkel 欠陥が起こると予想される。Frenkel 欠陥とは規則正しく原子が並んでいる半導体の一部の原子がずれ格子間に移動してしまう欠陥である。中性子が飛来すると図 4.3(a) の様に APD 中の Si と微量の不純物でできた結晶構造中の原子をたたき出し、格子空孔と格子間原子を生じる。Frenkel 欠陥によって生じた格子空孔と格子間原子の多くは短時間で再結合して消滅する (アニーリング) が、一部は安定した欠陥となり図

4.3(b) の様に半導体のバンドギャップ中に中間準位を作る。この中間準位によって高いバンドギャップを超えられなかった束縛電子が励起しやすくなることでリーク電流が増加する。したがって中性子による損傷は非電離的エネルギーによるものである。

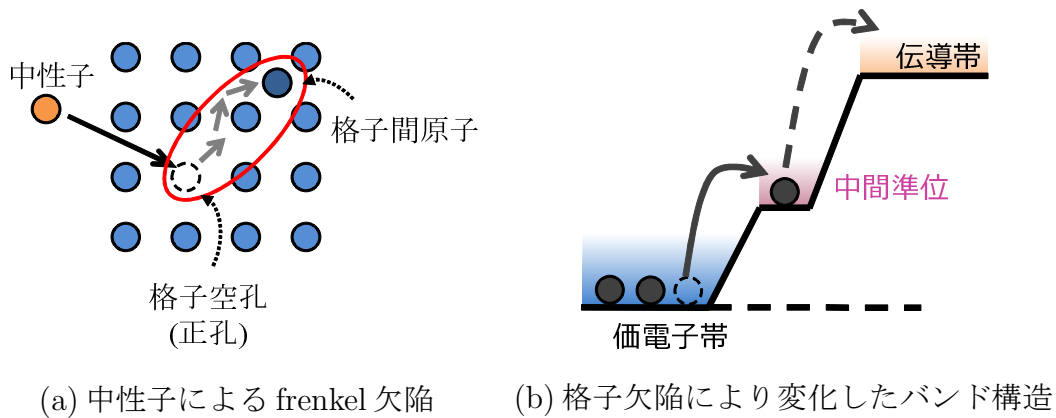


図 4.3: 中性子による HAPD 損傷の仕組み

(a) は中性子によって Frenkel 欠陥が生じている。(b) は Frenkel 欠陥によって中間準位が生じ電子が励起しやすくなることでリーク電流が増加する。

Frenkel 欠陥によるリーク電流増加量は中性子積算線量に依存する効果である。図 4.4 は 2009 年 10 月に東海村原子炉「弥生」において実施した HAPD の中性子照射試験の結果である [21]。この結果からリーク電流は中性子の照射線量に比例して増加することがわかる。

4.1.2 中性子対策

中性子によりリーク電流が増加することでノイズが増大し S/N 比を悪化させる。S/N 比の悪化は K/π 識別性能に直接影響を与えるため、リーク電流の増加を抑え S/N 比の悪化を防ぐ対策が必要となる。図 4.5 は APD の構造の概略図である。中性子対策としては以下の 3 つの方法があげられる。

- 1) P⁺ 層を薄くする
- 2) P 層を薄くする
- 2) 読み出し時 Shaping time の短縮

1) の P⁺ 層は受光面の最上部にあり電極と接している部分である。受光面から入射した光電子は空乏層中の原子と衝突し電子・正孔対を生成する。生成された

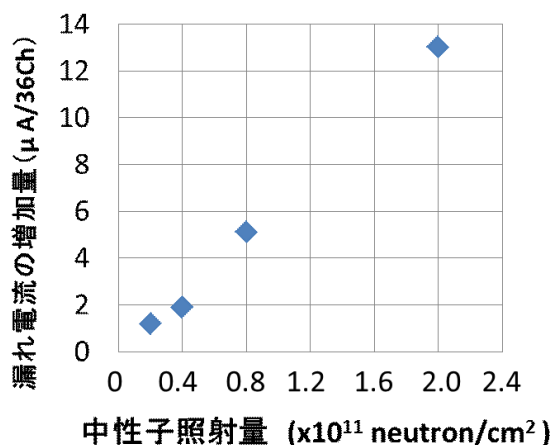


図 4.4: 中性子照射量に対し増加する HAPD のリーク電流
2009 年 10 月東海村原子炉「弥生」において中性子照射を行った [21]。

電子・正孔対は Avalanche 増幅した後、逆バイアスにより両極に引かれていくが、正孔は P⁺ 層に引き寄せられた後、電極から信号として読み出される。

しかし P⁺ 層は受光面の最上部にありキャリアである正孔が多く存在するため、高電圧で加速された光電子の進行を妨げるため打ち込み増幅率が低下してしまう。そのため P⁺ 層を薄くすることにより初段増幅である打ち込み増幅の低下を抑制し信号量が増加するので S/N 比が向上する。

2) の P 層を薄くすることはノイズの原因である格子欠陥を減らすためである。中間準位によって励起したキャリアも逆バイアスにより両極に引き寄せられるが、P 層での電子・N 層での正孔は Avalanche 領域で増幅されリーク電流の原因となる。しかし電子のキャリア移動度は正孔のキャリア移動度と比べて高いため、P 層で励起された電子は N 層で励起された正孔と比較して 100 倍程 Avalanche 増幅に寄与する事がわかっている。したがって P 層を薄くすることで Avalanche 増幅に寄与する電子の総数を減らしリーク電流の増加を抑える働きがある。通常 P 層の厚さは 10 μm 程であるが入射した光電子を完全に静止させ電子・正孔対にするには 2 μm 程あれば十分である事がわかっている [16]。

図 4.6(b) は浜松ホトニクスから発売されている 1ch APD (同図 (a)) の P 層の厚さを変えたものを、2010 年 1 月に東海村原子炉「弥生」にて 4×10^{11} n/cm² の中性子を照射した結果である [22]。

3) の読み出し時 Shaping time の短縮は中性子損傷によるノイズの増大はショットノイズと呼ばれる電子数の統計的揺らぎによる電子雑音が支配的である。ショットノイズ σ_{shot} は以下の式で表される [20]。

$$\sigma_{\text{shot}} \sim \sqrt{\frac{1}{e}(I_s + I_b FG)\tau} \quad (4.1)$$

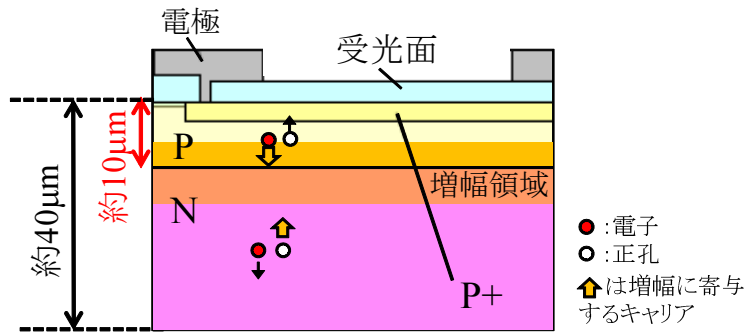
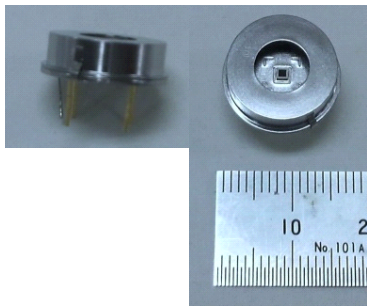
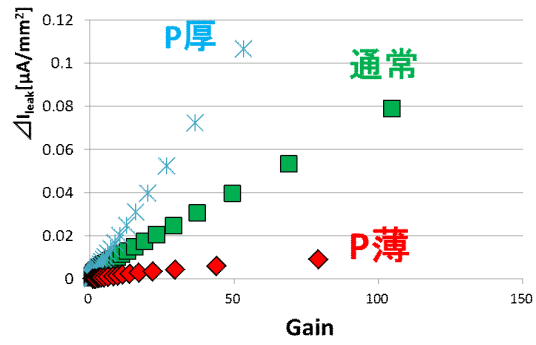


図 4.5: APD の構造概略図



(a) 1ch APD



(b) P 層の厚さとリーク電流の関係

図 4.6: 1ch APD の P 層の厚さとリーク電流の関係

ここで e は素電荷, I_s は電流が APD 表面を流れる表面電流, I_b は電流が Avalanche 増幅領域を通過するバルク電流, τ は shaping time, F はノイズ因子と呼ばれる量で ~ 2 , G は Avalanche 増幅率である。この式よりショットノイズは $\sqrt{\tau}$ に比例して増加することがわかる。また中性子による損傷の場合バルク電流が支配的になるため, 増幅器から生じたノイズを含めた最終的なノイズ σ_{noise} は

$$\sigma_{\text{noise}}^2 \sim \frac{(AC_{\text{det}})^2}{\tau} + \frac{1}{e} I_b F G \tau \quad (4.2)$$

となる。ここで A は信号回路の増幅器定数, C_{det} は検出器容量である。図 4.7 は 2010 年 11 月に東海村原子炉「弥生」にて $4 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の中性子を 2 種類の P 薄, 通常の厚さの HAPD 用 144ch APD に照射した際のリーク電流を (4.2) に代入し, Shaping time によるノイズの変化を表したものである [22]。この時 A は読み出し用 ASIC である SA02 の増幅器定数である $15 \text{ e}^-/\text{pF}$, Avalanche 増幅率 G を 40, 検出器容量 C_{det} を P 薄, 通常それぞれ 100, 430 pF としている。Belle II 実験 10 年分を想定するとリーク電流の増加が予測されるため Shaping time はより短い $100 < \tau < 200 \text{ ns}$ が最適であると思われる。そのため最終版 ASIC SA03 では Shaping time を $100 < \tau < 200 \text{ ns}$ に短縮した。SA03 については第 6 章で述べる。

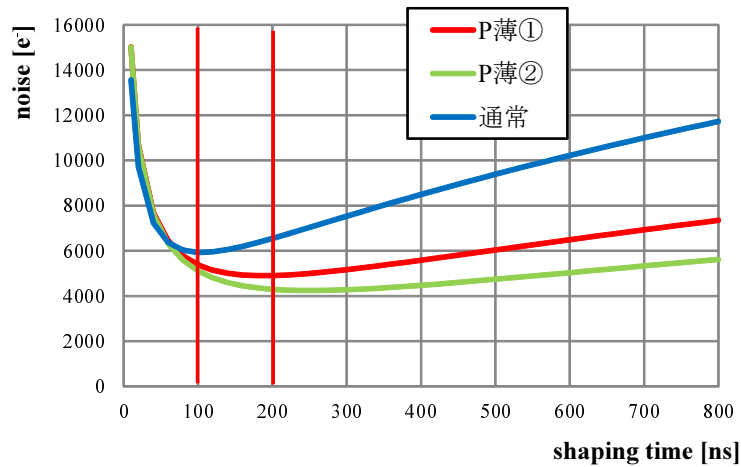


図 4.7: Shaping time と Noise の関係
 $4 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ (Belle II 実験 4 年分) の中性子照射時

4.2 ガンマ線発生原理と影響

ガンマ線も中性子と同様に Touschek 散乱, Radiative Bhabha 散乱によって発生し検出器外部から飛来する。Belle II 実験 10 年間で飛来するガンマ線量は Belle 実

験時に SVD の dock と呼ばれる信号接続部に取り付けられたアラニン線量計と ECL で使用されている CsI(Tl) の蓄積エネルギーから見積もられた。これらが A-RICH ガンマ線量の見積に使用されたのは Belle 実験時の SVD と ECL の位置が A-RICH と近いためである (図 4.8)。SVD のアラニン線量計で測定された線量は積分ルミノシティが 70 fb^{-1} で 3.6 Gy 、ECL の CsI(Tl) の蓄積エネルギーで求められた線量では 766 fb^{-1} で 2.36 Gy であった。Belle II 実験では 10 年間で 50 ab^{-1} である事を考慮すると、これらの値から Belle II 実験の衝突点付近でのガンマ線量は $1,000 \sim 2,500 \text{ Gy}$ であると見積もられた。また A-RICH へ飛来するガンマ線量は $1,000 \text{ Gy}$ であると見積もられた。そのため A-RICH で使用する HAPD は $1,000 \text{ Gy}$ のガンマ線耐性が必要である。

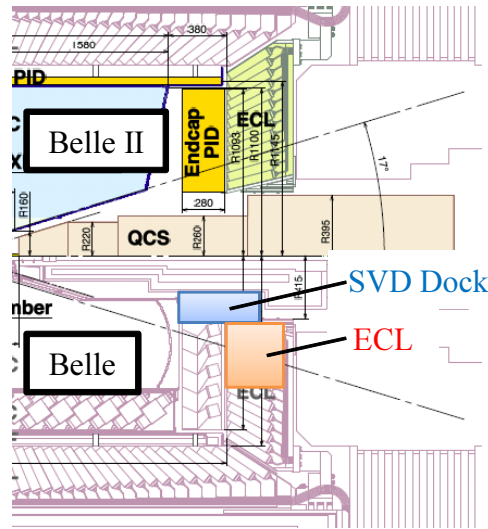


図 4.8: ECL と SVD Dock の位置
 下半分が Belle 実験時の構造であり上半分が Belle II 実験時の構造

ガンマ線の積算線量に依存する半導体への影響は電離的エネルギーによるものが支配的であると考えられる。ガンマ線は主にシリコン基板と酸化膜 (SiO_2) の接触面 (界面) に影響を及ぼす。入射したガンマ線は SiO_2 中の電子を弾き出し電子・正孔対を作るが正孔は電子と比較して移動速度が遅いため、酸化膜中の空乏等の構造欠陥に捕獲され移動しなくなる。これを正電荷捕獲と言う。正電荷捕獲により APD 中の電場が変化することで Avalanche 増幅率の低下が予想された。また正電荷捕獲によりシリコン基盤と酸化膜 (SiO_2) が接触している面 ($\text{Si} - \text{SiO}_2$ 界面) に新しい順位 (界面準位) が生成される。これにより励起される電子が増加し表面電流が増加すると考えられる。表面電流により増加するショットノイズは (4.1) より

$$\sigma_{shot}^2 \sim \frac{1}{e} I_s \tau \quad (4.3)$$

であり、増幅器からのノイズを含めた最終的なノイズは

$$\sigma_{\text{noise}}^2 \sim \frac{(AC_{\text{det}})^2}{\tau} + \frac{1}{e} I_s \tau \quad (4.4)$$

となる。中性子損傷によるバルク電流から見積もるノイズ(4.2)と比べると \sqrt{FG} 倍少なくなることがわかる。

4.3 過去のガンマ線照射試験

本研究以前に HAPD と APD のガンマ線照射試験を 2010 年より計 4 回行った。本節では過去のガンマ線照射試験の概要と結果を報告する。

4.3.1 照射セットアップ

全てのガンマ線照射試験は名古屋大学にある ^{60}Co 照射室にて行われた。図 4.9 はガンマ線照射試験のセットアップである。照射台中央部のシリンダー下部より照射中は線源である ^{60}Co がせり上がってくる。また線源を中心とした同心円状に溝が掘られており線源との距離を変える事により照射レートを調節することが出来る。サンプルは照射中もバイアス供給が出来る様ケーブルが接続され、照射室外部から印加電圧を変化させることが出来る。照射中サンプルが放電をしないようカプトンテープで覆われたアルミ箔で包まれている。

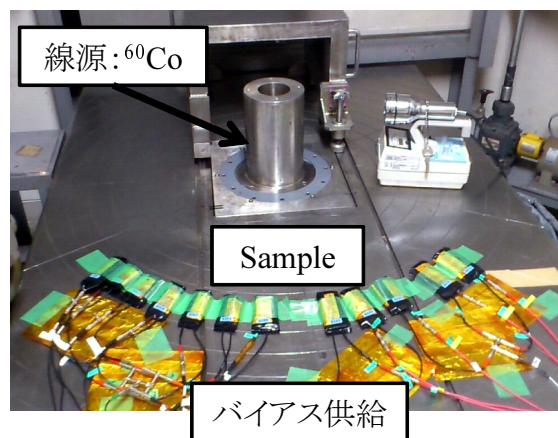


図 4.9: 照射試験のセットアップ

照射中の APD への影響を知るために照射中は以下の 2 種類の測定を行った。一つは照射中電流測定である。これは照射中に印加電圧を一定に保ち電流値をモニタリングする方法である。印加電圧が一定であるためこの方法により電流値に変化があればガンマ線による影響であることが分かる。もう一つはバイアススキャンと呼ばれる方法である。この方法は印加電圧を一度下げ数 V ずつ上昇させなが

ら電流値を読み取る方法である。バイアススキャンを一定間隔ごとに行うことにより累積線量による変化を見積もることが出来る。

4.3.2 照射サンプル

図 4.10 はガンマ線照射試験に使用したサンプルの種類である。ガンマ線照射には HAPD と 144ch APD, 1chAPD の 3 種類の形状のサンプルを使用した。144ch APD は HAPD に封入する APD 部分を抜き出した多チャンネルの APD である。HAPD と同様に、 $6 \times 6 = 36$ にピクセル化された APD チップが 4 枚内蔵され全 144ch を持つ。角型 APD を用いることで HAPD の集積構造とガンマ線ダメージの関係の確認を行える。1chAPD は 144ch APD の 1ch 分を抜き出した APD であり APD 構造とガンマ線損傷の関係を調べるのに適している。

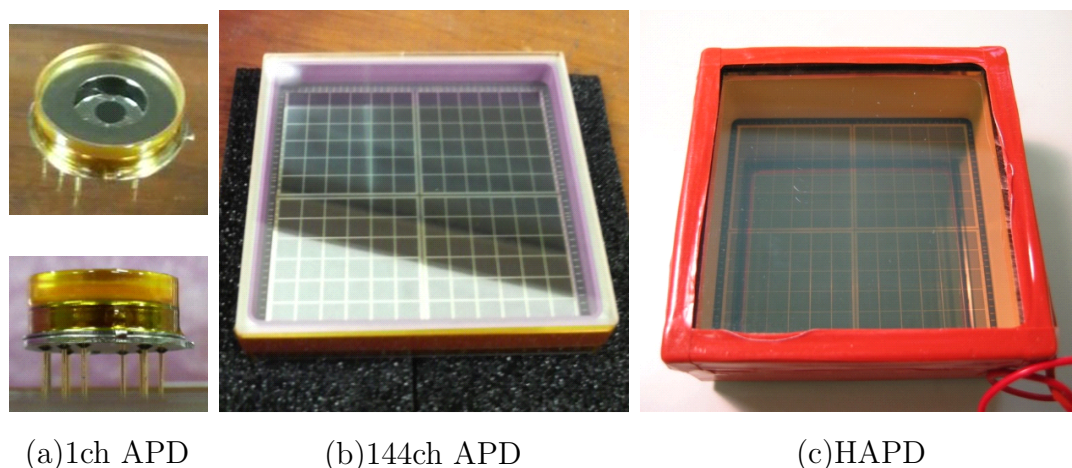


図 4.10: 照射試験用サンプル

図 4.11 は HAPD 用 APD の断面模式図である。APD への電子入射面である P⁺層上部には受光面保護膜と呼ばれる膜が形成されている。浜松ホトニクスから詳細は伝えられていないが受光面膜は A, B, C と 3 種類の膜質が存在する。また同図点線部で囲まれている受光面保護膜と層間絶縁膜は HAPD 化する際に必要な膜である。アルカリ保護膜は HAPD の光電面をアルカリ活性する際にアルカリ金属から APD を保護するために、層間絶縁膜はチャンネル間の絶縁のために形成されている。また、電子線遮蔽用電極は入射する光電子から配線等を保護するための電極で、層間絶縁膜上部に形成される。今後、いずれかの HAPD 用膜が付いた APD を HAPD 用 APD、どの膜も付いていないものを光用 APD と表記する

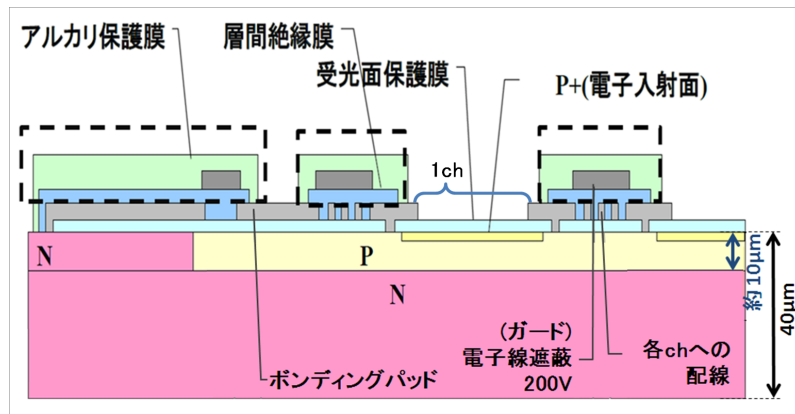


図 4.11: HAPD 用 APD の断面模式図

4.3.3 照射試験結果

ガンマ線による HAPD への影響

ガンマ線照射試験により HAPD には以下の 2 点の影響があることが分かった。

- 1) 絶縁破壊が生じた様な急激な電流の上昇
- 2) 高積算線量による緩やかな電流上昇

2011 年 6 月に実施したガンマ線照射試験により 1) の絶縁破壊が生じた様な急激な電流の上昇を確認した。1 チャンネル APD の照射試験の照射中電流測定の結果を図 4.12 に示す [24]。この現象は光用 APD では発生せず、全ての HAPD 用 APD では急激な電流上昇を確認した。

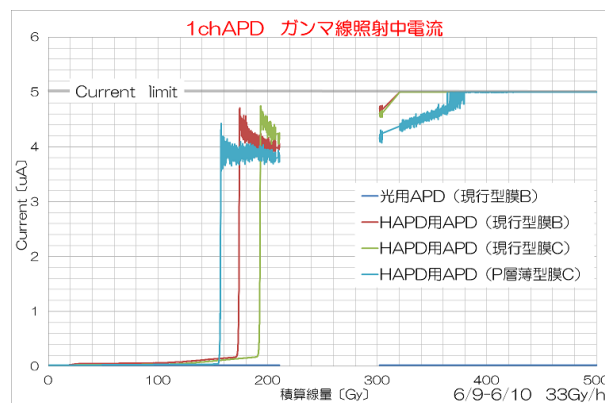


図 4.12: 1 チャンネル APD の照射中電流測定結果
HAPD 用 APD では急激な電流上昇が生じた。

また照射中に複数回行ったバイアススキャンの結果が図 4.13 である。HAPD 用 APD では絶縁破壊(ブレイクダウン)の様な急激な電流上昇が確認され、さらに積算線量が増加するにつれ急激な電流上昇の発生する電圧が低下した。図 4.14 は 770 Gy 照射中に急激な電流上昇が発生した APD の照射後のバイアススキャン結果である。この結果より急激な電流上昇が起きる電圧は照射終了後、時間経過によって回復していくことが分かった。

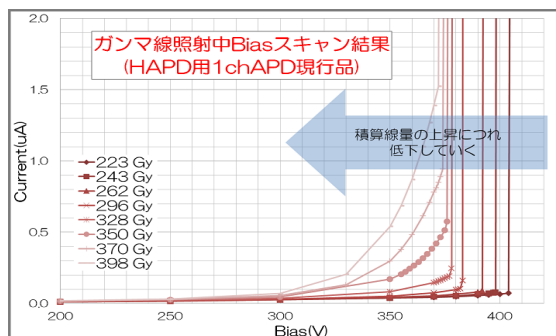


図 4.13: 照射中バイアススキャン

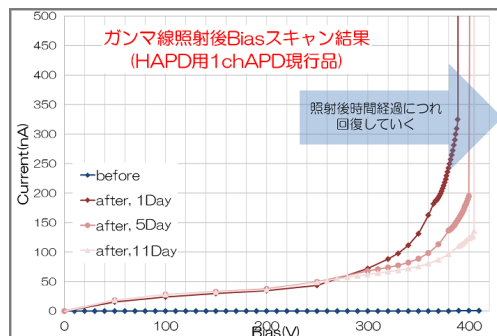


図 4.14: 照射後バイアススキャン

2) はブレイクダウンの様な急激な電流上昇とは違い積算線量が増加するにつれ緩やかに暗電流が増加する。図 4.15 は図 4.13 の APD を 2 日に分けてガンマ線照射した際の照射中電流測定の結果である。1 日目の照射の最後に設定電圧で急激な電流上昇が確認された。2 日目の照射中 300 Gy を超えたあたりから緩やかに電流が上昇しているのが確認された。この緩やかな電流上昇は HAPD 用 APD のみに現れた現象であり、図 4.13 で見られるような緩やかな電流上昇と同じものであると考えられる。また緩やかな電流上昇も照射終了後、時間経過によって回復していくことが分かった。

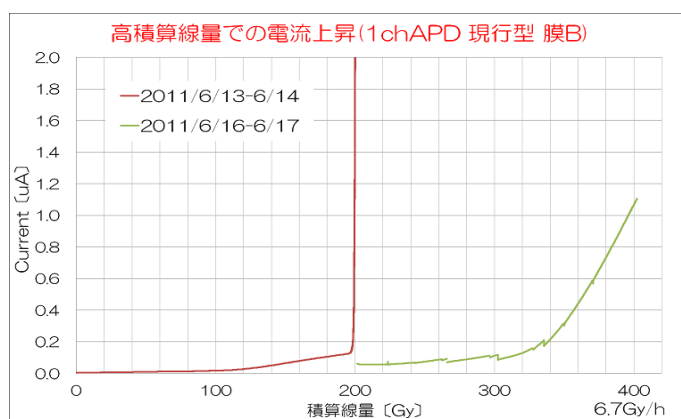


図 4.15: 1チャンネル APD の照射中電流測定結果
HAPD 用 APD では急激な電流上昇が生じた。

浜松ホトニクスによる急激な電流上昇が発生した APD の照射前後に行われた発光検査の結果を図 4.16 に示す [24]。発光検査とは、特殊な装置を用い逆バイアス電圧印加時の放電による発光の様子を撮影したもので、放電している部位を特定できる。照射前では電圧を上昇させると受光面部で発光していた。これは Avalanche 増幅領域でのブレイクダウンで正常な現象である。しかし照射後、急激な電流上昇をした APD 周辺部の Al パッドの下部から発光しているのが確認された。この現象は通常のブレイクダウンとは異なるため今後は周辺部ブレイクダウンと呼ぶ。

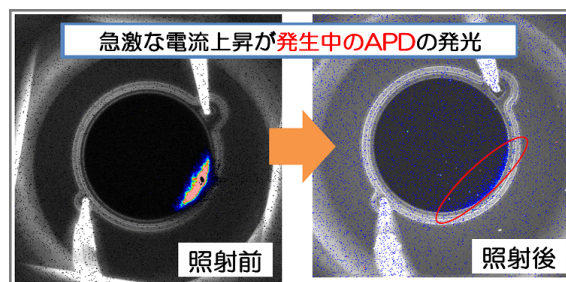


図 4.16: 1 チャンネル APD の発光検査

これまでに得られた情報から周辺部ブレイクダウン発生メカニズムの仮説を説明する。

- 1) ガンマ線により HAPD 用膜に電離作用を及ぼし絶縁膜上部が正に帯電。(図 4.17(a))
- 2) 負電荷が P 層上部に引き寄せられることで P 層上部が N 層化。(同図 (b))
- 3) P 層の N 層化した部分と P⁺ 層間の距離が短くなり耐電圧が低下し放電。

したがって周辺部ブレイクダウンの原因として HAPD 用膜であるアルカリ保護膜か層間絶縁膜のどちらかであると考えられる。

照射前後のノイズ量と Avalanche 増幅率の変化を図 4.18, 図 4.19 に示す。ノイズの増加量は周辺部ブレイクダウンが発生するまでは許容できる値であった。また当初予想された Avalanche 増幅率の低下は周辺部ブレイクダウンが発生するまで確認されなかった。

4.3.4 ガンマ線対策

前節で示した周辺部ブレイクダウンが発生するとノイズが上昇し Belle II 実験では使用不可能である。そのため Belle II 実験 10 年間で予想されるガンマ線照射量 1,000 Gy を照射しても周辺部ブレイクダウンが発生しない、もしくは発生しても Belle II 実験で印加予定の Avalanche 増幅率 40 倍を得られる印加電圧まで低下しない事が要求される。

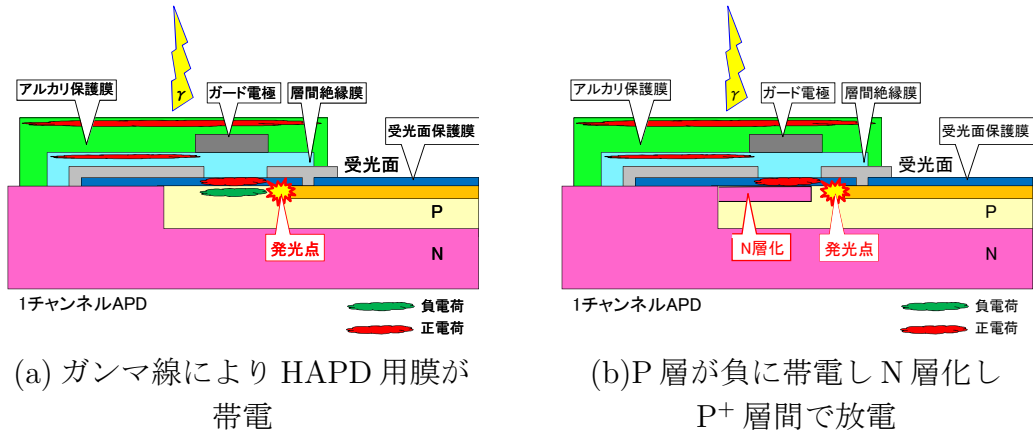


図 4.17: 照射前後のノイズ量

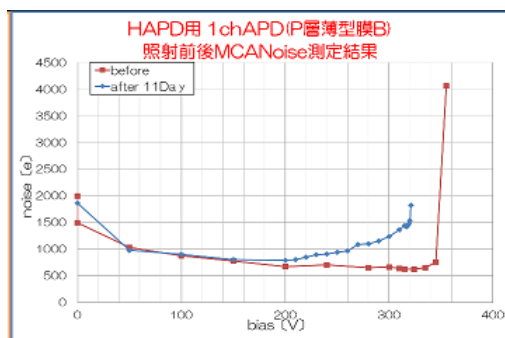


図 4.18: 照射前後のノイズ量

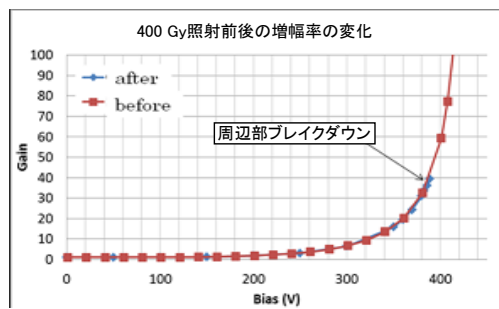


図 4.19: 照射前後の Avalanche 増幅率

ガンマ線対策として以下の2点が挙げられる。

- 1) アルカリ保護膜の除去
- 2) 中間電極の実装

1) のアルカリ保護膜の除去の説明をする。周辺部ブレイクダウンの原因として HAPD 用膜であるアルカリ保護膜か層間絶縁膜が予想された。そこでアルカリ保護膜、層間絶縁膜それぞれがない APD を製作しガンマ線照射試験を行った結果、アルカリ保護膜が周辺部ブレイクダウンに寄与している事が判明し、層間絶縁膜のみでは周辺部ブレイクダウンを起こさないことが分かった。また緩やかな電流上昇もアルカリ保護膜を外した APD は影響も抑えられることが分かった [24]。アルカリ保護膜は HAPD の光電面をアルカリ活性する際にアルカリ金属から APD を保護するために付けられていたが、浜松ホトニクスによる HAPD の製法改善によりアルカリ保護膜を使用せずに HAPD を製造することに成功した。しかしこの製法は受光面膜質が A と C のタイプの HAPD しか製造することが出来なかった。

2) の中間電極の実装は図 4.20 の様に電子線遮蔽用電極の下部に新たに電極を実装する。アルカリ保護膜を除去した APD でも緩やかな電流上昇が確認されたため電子線遮蔽用電極下部の N 層と P 層間の耐圧が低下していると考えられる。そこで逆バイアス電圧 (約 400 V) とグラウンドとの間に電子線遮蔽用電極と同じ電圧の中間電極 (約 200 V) を実装することで N 層と P 層間の電圧を安定させる働きがあり、耐電圧の低下が抑えられる。

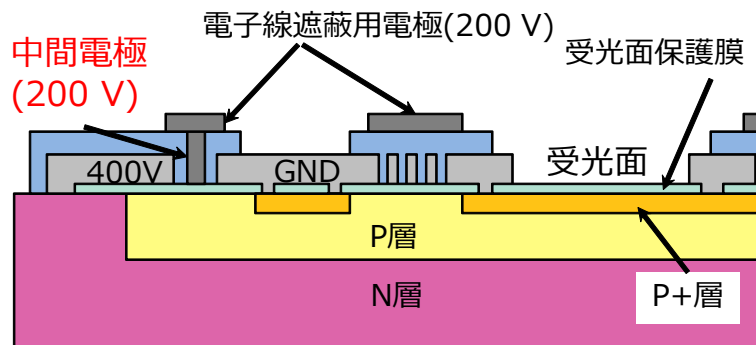


図 4.20: 中間電極の実装

これらの効果を確認するために 2012 年 2 月に 144ch APD に 1,000 Gy のガンマ線照射を行った。ガンマ線照射中の各チップのリーク電流の結果が図 4.21 である。この試験時は受光面膜質 A で中間電極が有るタイプの APD は作られなかった。この結果より 3 種類の APD では周辺部ブレイクダウンは発生しない事を確認した。また受光面膜質 A と C では受光面膜質 A の方が照射中のリーク電流の増加が少なく、受光面膜質 C で中間電極有りのタイプは中間電極がないタイプと比較して

リーク電流の増加が少ないことを確認した。そのため受光面膜質 A，中間電極有りの HAPD が最もガンマ線に耐性があると考えられる。

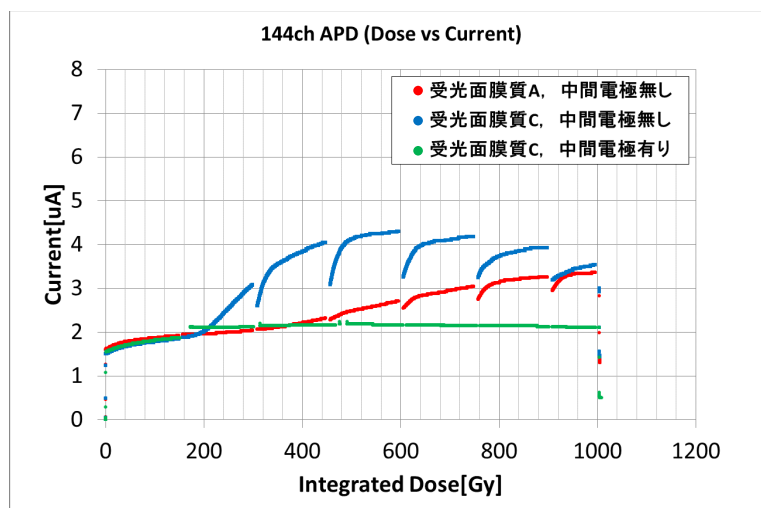


図 4.21: ガンマ線照射中のリーク電流

4.4 HAPD の放射線耐性のまとめ

A-RICH 検出器は Belle II 実験期間中に中性子が 10^{12} n/cm²，ガンマ線が 1,000 Gy と予想される厳しい放射線環境下に置かれることになるため，これらの放射線耐性を持たなければならない。特に損傷が激しいと予想されるのが半導体からできている HAPD であり，それぞれの放射線耐性向上の研究が行われてきた。飛来する中性子により半導体中に Frenkel 欠陥を起し中間電位が生じることでリーク電流が増加する。この中性子対策としては，P⁺層を薄くする，P層を薄くする，読み出し時 Shaping time の短縮をすることで中性子耐性が向上することが確認された。ガンマ線の影響としては当初想定していなかった周辺部ブレイクダウンが発生した。この現象は APD 表面の保護膜が正に帯電することで P 層上部に負電荷が集まり N 層化し，N 層と P⁺層との間の耐電圧が低下することで引き起こされると考えられる。このガンマ線対策としては HAPD の新製法によるアルカリ保護膜の除去，中間電極の実装が挙げられる。またこの対策の確認のため行われたガンマ線照射試験により受光面膜質 A のタイプがよりガンマ線に耐性がある事が確認された。

5 HAPDの放射線照射試験

前章で中性子，ガンマ線の損傷要因の特定と対策をそれぞれに対して考察した。本章ではそれぞれの対策を行った最終仕様候補 HAPD を数種類作成し中性子，ガンマ線の照射試験を実施し最終仕様を決定した。以下に同一の HAPD に照射した中性子照射試験とガンマ線照射試験の結果と，最終仕様の HAPD について報告する。

5.1 放射線照射試験の目的

今までの研究で中性子，ガンマ線による HAPD の損傷要因を特定しそれぞれに対して対策を研究してきた。しかしシミュレーションの結果より東海村原子炉「弥生」で行われた中性子照射試験では Belle II 実験 4 年分の中性子量しか照射していないことが確認された。また今までの放射線照射試験では中性子とガンマ線両方を照射したことがないためそれぞれの対策が互いに独立である事が確認できていない。そのため BelleII 実験 10 年分の中性子照射に耐性を持つか，それぞれの対策が独立であり 10 年分の中性子，ガンマ線を照射後も HAPD が使用可能であることを確認する必要がある。そこで HAPD の最終仕様を決定するために最終仕様候補 HAPD にまず Belle II 実験 10 年分相当の中性子照射試験を実施し，その後，続けてガンマ線照射試験を実施した。

5.2 最終仕様候補 HAPD

最終仕様候補の HAPD として図 5.1 の APD 断面模式図のうち赤文字で記した部分を変更した HAPD を製作した。まず中性子対策として，P 層が最も中性子損傷によりリーク電流が増加することが確認されていたため，P 層は全て薄いタイプである。P⁺ 層を薄くすることにより打ち込み増幅率が大きくなるため P⁺ 層が薄い HAPD を製作したが，製造工程の違いにより受光面膜質 C の HAPD より A の方が薄くなっている。そのため打ち込み増幅率は A タイプが高くなっており中性子耐性が向上している。ガンマ線対策としてアルカリ保護膜は全てのタイプで未実装であり，受光面膜質は A と C を用意した。4.3.4 より受光面膜質 A は受光面膜質 C よりもガンマ線耐性があると考えられるため受光面膜質 A を第一候補とした。また中間電極の実装によりガンマ線照射中のリーク電流の抑制が確認できたため中間電極有りの HAPD が作られた。しかし受光面膜質 A で中間電極有りのサンプルのガンマ線照射は初であったため受光面膜質 A，中間電極無しのサンプルも製作された。表 5.1 が製作した HAPD のパラメータである。

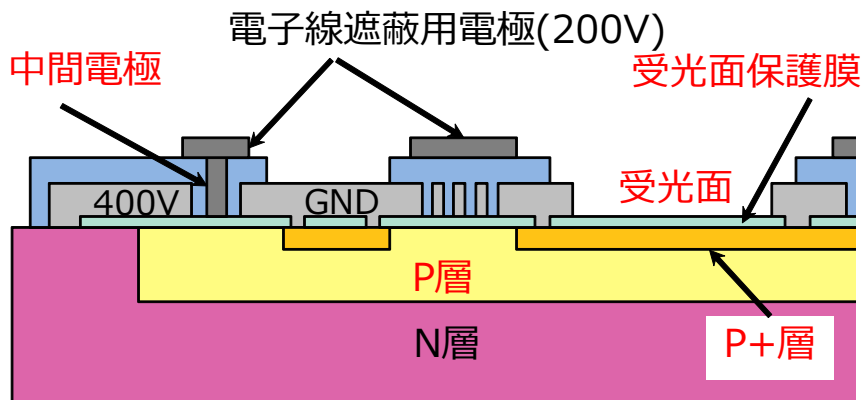


図 5.1: APD 断面模式図

表 5.1: 最終仕様候補 HAPD のパラメータ

No	アルカリ 保護膜	受光面 膜質	P層	P+層	中間電極	打ち込み 増幅率(最大)	QE [%] @400 nm
KA058	×	A	薄	薄	○	1950	30.1
KA059					×	2050	30.8
KA060					×	1900	33.4
KA062					×	1950	32.1
KA063					○	1710	33.6

5.3 中性子照射試験

5.3.1 中性子照射施設

2012年6月に茨城県東海村 J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) にある中性子ビームライン BL10 にて中性照射試験を行った [17]。図 5.2 は BL10 の概略図である。MLF では加速器からのパルス陽子ビーム (3 GeV, 25 Hz, 333 μ A) を水銀ターゲットに当てる事で核破砕反応を起こし中性子ビームを得る。BL10 での中性子ビームサイズは $10 \times 10 \text{ cm}^2$ であるので HAPD 全体を照射する事が可能であり、鉛フィルタや B_4C フィルタを挿入することで同時に発生するガンマ線や熱中性子を抑制することが出来る。鉛フィルタは 25 mm と 50 mm 厚があり、 B_4C フィルタは 2 枚まで挿入できる。

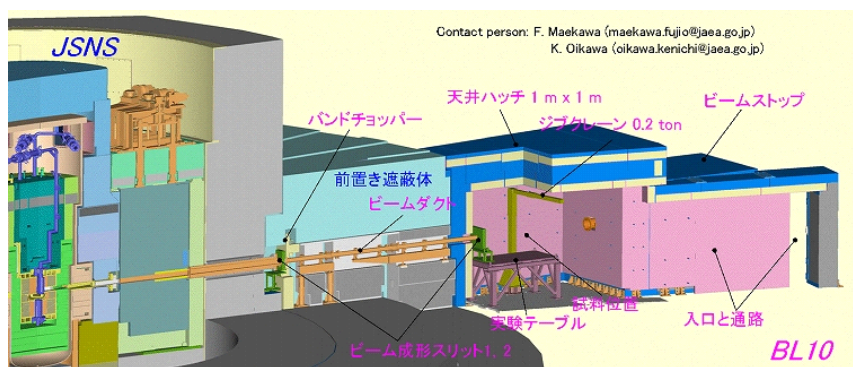


図 5.2: 中性子ビームライン BL10 の概略図

HAPD での試験の前に ELMA diode を用いて中性子照射量, アラニン線量計を用いてガンマ線照射量の測定を行った。ELMA diode は中性子照射量によるリーク電流の増加量がよくわかっており, ELMA diode のリーク電流の増加量から中性子照射量を見積もることが出来る。この際熱中性子を抑制するため 2 枚の B_4C フィルタを, ガンマ線抑制のため 50 mm の鉛フィルタを用い測定を行った。図 5.3(a) は BL10 のビームエネルギーで, 同図 (b) はビームエネルギーを 1 MeV に変換するための係数, 同図 (c) は鉛フィルタの中性子透過量である。50 mm の鉛フィルタの中性子照射量から 25 mm, フィルタ無し (0 mm) の中性子強度を見積もった。これらの値から Belle II10 年分の中性子量である $10 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ 照射するための時間を求めた。それらの結果を表 5.2 に示す。鉛フィルタは 25 mm 厚を採用した。

5.3.2 中性子照射セットアップ

図 5.4 は HAPD のセットアップ図である。架台の上に個々にアルミ箔で包んだ HAPD を受光面をビーム軸に沿って並べる。図 5.5 の HAPD 配置図の様に, 各 HAPD の受光面部と最後部に ELMA diode を, 最前部と最後部にアラニン線量計

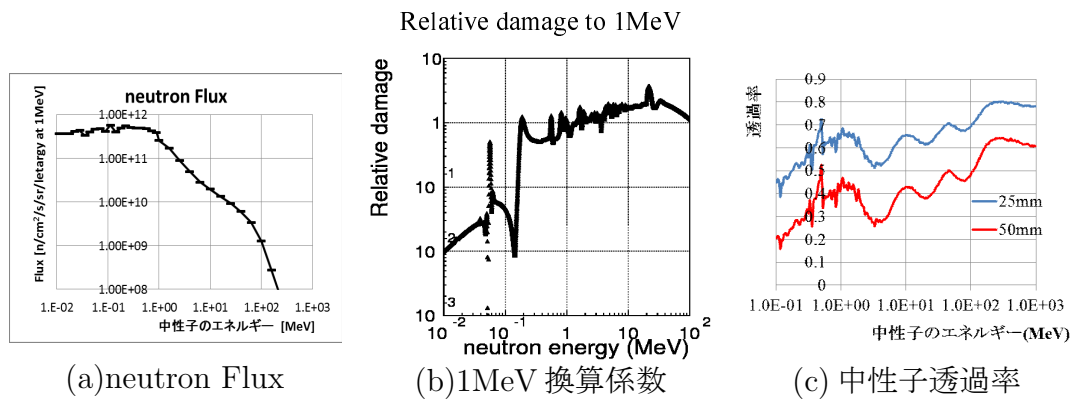


図 5.3: 中性子線量

(a) は BL10 のビームエネルギーであり (b)1MeV に換算するための係数, (c) は鉛フィルタを挿入した際の中性子透過率である。最終的な中性子線量を求めるにはこれらすべてを掛け合わせる。

表 5.2: 鉛厚と中性子照射時間

Pb 厚 [mm]	中性子強度 [neutron/cm ² /s/MW]	照射時間 [h]	総ガンマ線照射量 [Gy]
50	1.24×10^7	~81	14
25	2.05×10^7	~48	60
0	3.04×10^7	~29	240

を貼付し中性子量，ガンマ線量を測定した。後方の HAPD は中性子線量が少なくなることが予測されるため最前部に第一候補である KA058 を設置した。照射中はガンマ線照射試験と異なりバイアスや高電圧は印加しない。

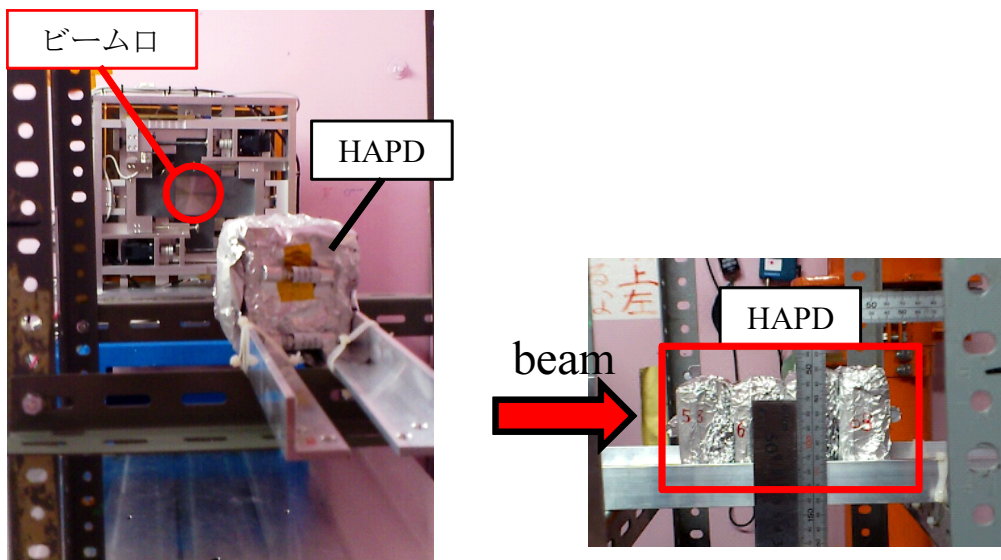


図 5.4: 中性子照射試験のセットアップ

架台の上にアルミ箔で包んだ HAPD を受光面をビーム軸方向に沿って並べる。

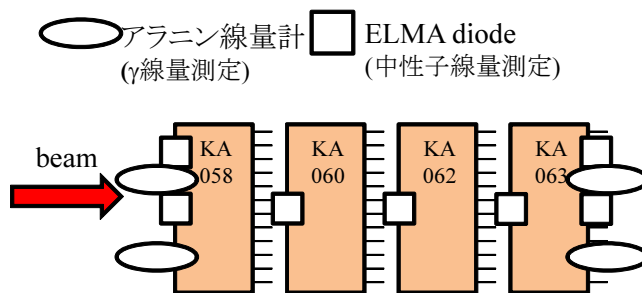


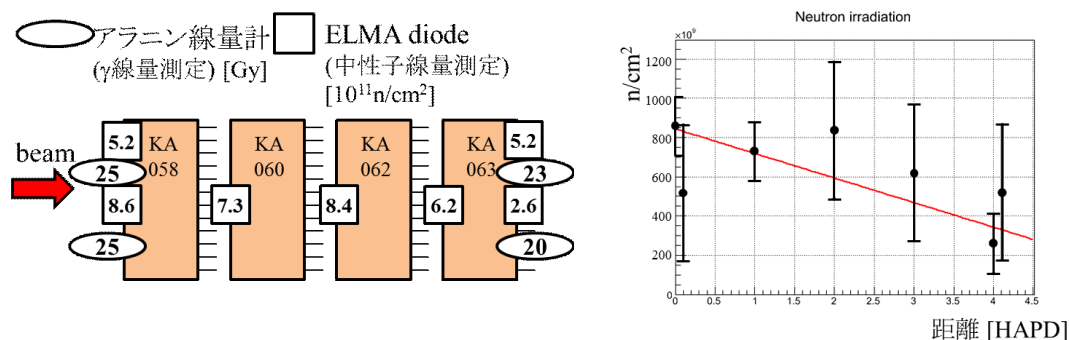
図 5.5: HAPD の配置図

ビーム軸方向に沿って 4 台並べる。各 HAPD の受光面部と最後部に ELMA diode を，最前部と最後部にアラニン線量計を貼付し中性子量，ガンマ線量を測定した。

5.3.3 中性子照射試験結果

中性子照射量

図 5.6(a) に各 ELMA diode とアラニン線量計で測定した中性子，ガンマ線量を示す。同図 (b) は測定された中性子線量をフィッティングした結果である。この結果から各 HAPD の中性子線量は表 5.3 である。ガンマ線量は 20～25 Gy と低くガンマ線による影響はほぼないと思われる。



(a)ELMA diode とアラニン線量計の照射線量

(b) 中性子照射線量

図 5.6: 中性子照射線量

(a) は各 ELMA diode とアラニン線量計で測定されて照射線量。 (b) は測定された中性子線量から各 HAPD の中性子線量を見積もった結果。

表 5.3: ELMA diode から見積もった各 HAPD の中性子線量とガンマ線量

No.	中性子線量 [n/cm^2]	ガンマ線量 [Gy]
KA058	8.6×10^{11}	20 ~ 25
KA060	7.25×10^{11}	
KA062	6.0×10^{11}	
KA063	4.75×10^{11}	

量子効率測定

照射前後における量子効率 (QE : Quantum Efficiency) の変化を調べるため浜松ホトニクス社で QE 測定を行った。図 5.6 は KA060 の中性子照射前後の QE の比較である。この測定は光電面に $-1,500$ V 印加して波長ごとに光電流を測定し、較正された光量モニター用フォトダイオードの光電流と比較をしたものである。この結果より中性子照射前後で QE の変化がないことを確認した。

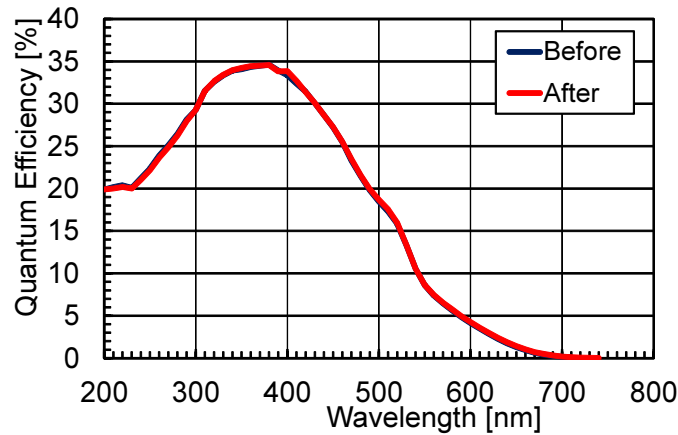


図 5.7: KA060 の QE 測定

リーク電流測定

リーク電流測定の結果を示す。図 5.8 は照射前に Avalanche 増幅率 40 倍の電圧を印加した時の chip 毎のリーク電流値を日数をおいて測定したものである。中性子損傷により発生した Frenkel 欠陥の一部は時間とともにアニーリングするためリーク電流の減少が確認できる。中性子照射後の HAPD は熱処理等のアニーリング効果を増す操作をせず常温で安置した。今回の照射試験は Belle II 実験 10 年分の中性を 2 日程で照射したのでアニーリングによりリーク電流の減少を確認できたが、Belle II 使用時はアニーリングしながらの使用となるため、リーク電流が下がりきった状態で測定を行えばよい。よって以降の結果は中性子照射後 30 日以上経過した HAPD の結果である。

図 5.9 は照射量毎に Avalanche 増幅率 30 倍時のリーク電流の増加量をプロットしたものである。このグラフより KA058, KA060, KA062 の HAPD は照射量に比例して増加しているのに対して KA063 は明らかに増加量が多い。これらの違いは KA058, KA060, KA062 は受光面膜質 A, P⁺ 層が薄いタイプのものであるのに対して KA063 は受光面膜質 C, P⁺ 層が普通のタイプである。中性子による HAPD の損傷で引き起こされるリーク電流の増加は増幅領域を通過するバルク電流が支配的であると考えられるので、APD 表面の受光面膜質や P⁺ 層との関係はないはずである。これについての考察はノイズ測定の結果の報告後に行う。また中間電極はリーク電流の増減に影響を与えないと言える。

受光面膜質 A, P⁺ 層が薄いタイプは照射量に比例してリーク電流が増加しているため $10 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ 照射時のリーク電流の増加量を予測すると $0.025 \mu\text{A/mm}^2$ となる。

図 5.10(a) は KA058 chipA の印加電圧を変化させた際のチャンネル毎のリーク電流である。同図 (b) は同じ chip の Avalanche 増幅率 30 倍時のチャンネル毎のリーク電流である。右下が HAPD 中心部となっており中心部がより高いリーク電流と

なっているが差は10%と小さい。また他のチャンネルと比較してリーク電流が大きいチャンネルはないので集積化による劣化の位置依存性はないと言える。

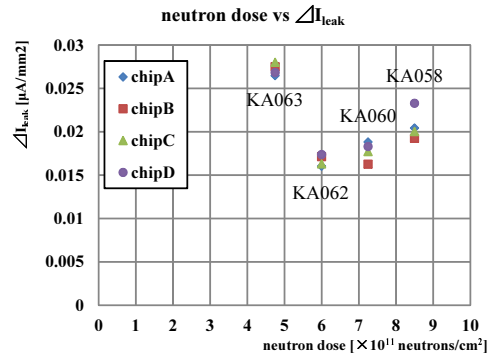
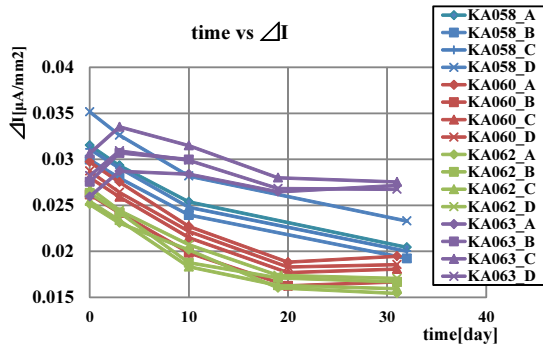
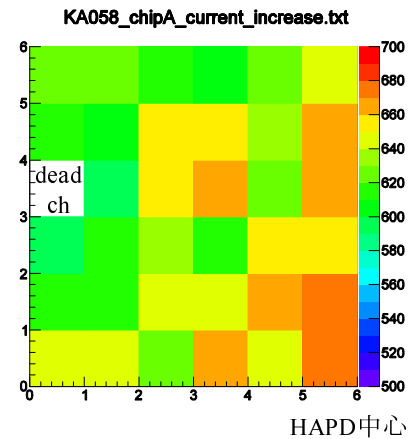
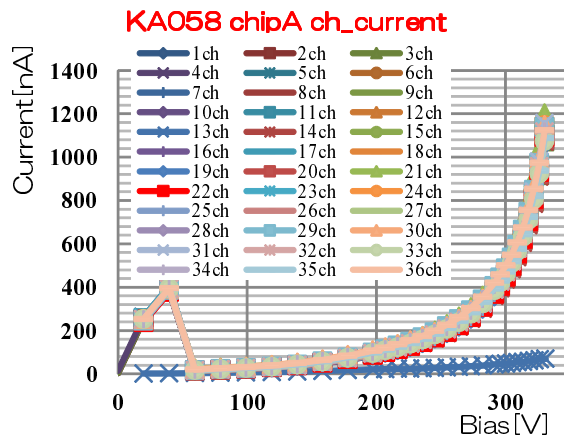


図 5.8: アニーリングによるリーク電流の減少

図 5.9: 中性子照射量とリーク電流



(a)KA058 chipA のチャンネル毎のリーク電流

(b) 各チャンネルのリーク電流増加量

図 5.10: KA058 chipA のチャンネル毎のリーク電流

(a) は印加電圧を変化させた際のリーク電流。(b) は Avalanche 増幅率 30 倍の時のチャンネル毎のリーク電流であり右下が HAPD 中心部。

ノイズ測定

ノイズの測定と1光子入力時のS/N測定ではピークホールドMCA(Multi Channel Analyser)を用いて測定を行った。図5.11はセットアップ図である。ノイズ測定をする際にはLED光を当てずに行い、1光子のS/N測定はLED光を用いて行う。こ

の際読み出し用の増幅器として Shaping time を調整できるもの (高速波形整形増幅器 (クリアパルス 4467A)) を使用した。

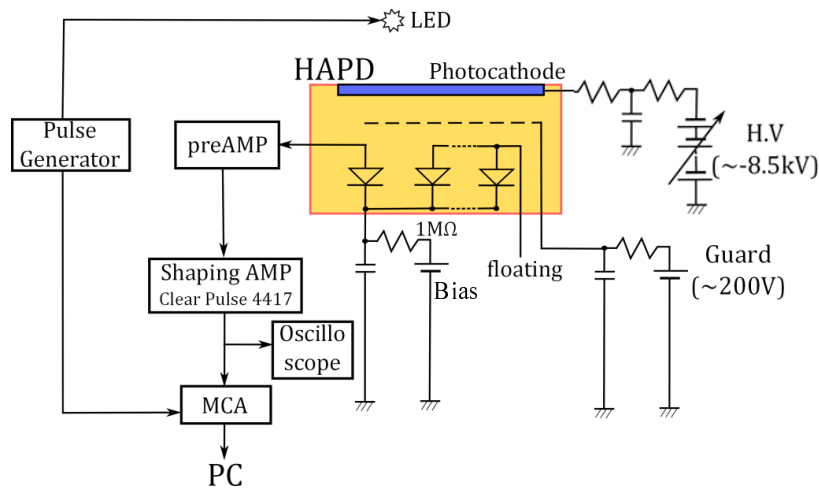


図 5.11: ノイズ測定, 1 光子の S/N 測定の際のセットアップ

図 5.12 は KA058, KA060 の Avalanche 増幅率 30, shapingtime 100 ns の時のノイズである。HAPD 各 chip の 4 隅と中央部の 1 チャンネルを測定した。この結果 chip 内でのノイズのばらつきは少なく, また 4,000~6,000 e^- と十分に使用可能なノイズ量であると言える。

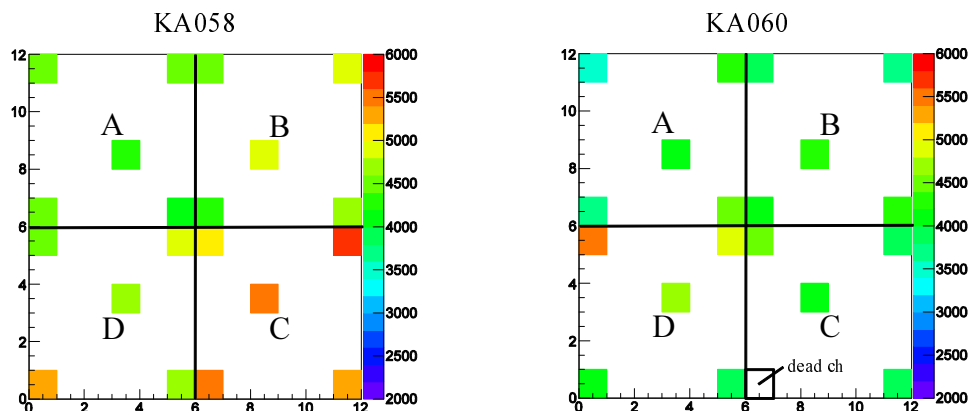


図 5.12: ノイズ測定結果
Avalanche 増幅率 30, shaping time 100 ns

次にリーク電流とノイズの関係を調べる。

リーク電流がすべてバルク電流と仮定するとノイズの増加量は (4.2) から次の様

になる。

$$\Delta\sigma_{\text{noise}} = \sqrt{\sigma_{\text{after}}^2 - \sigma_{\text{before}}^2} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{\text{after}}^2 \sim \frac{1}{e} I_{\text{after}} F G \tau \quad (5.2)$$

ここで $F = 2, \tau = 100$ とした。この式から見積もった各 HAPD のノイズ増加量と MCA で測定したノイズ増加量をプロットしたものが図 5.13 である。MCA で測定したノイズの増加量はプロットで、実線はリーク電流から計算したノイズ増加量である。この図よりリーク電流からの見積りとノイズ測定値はよく一致しており、リーク電流は増幅部を通過するバルク電流が支配的であることが分かる。

また KA063 もバルク電流が支配的であるため APD 内部の違いに問題があると考えられる。受光面膜質 C では製造行程の違いにより P⁺ 層の厚さが膜質 A と比較して厚くなっている事が原因の 1 つであることが考えられる。また製造工程により P⁺ 層の厚さが異なるように、P 層の厚さも異なっている可能性がある。したがって P 層と P⁺ 層の厚さを受光面膜質 A の HAPD と同様の厚さにすればリーク電流を抑えられると思われる。

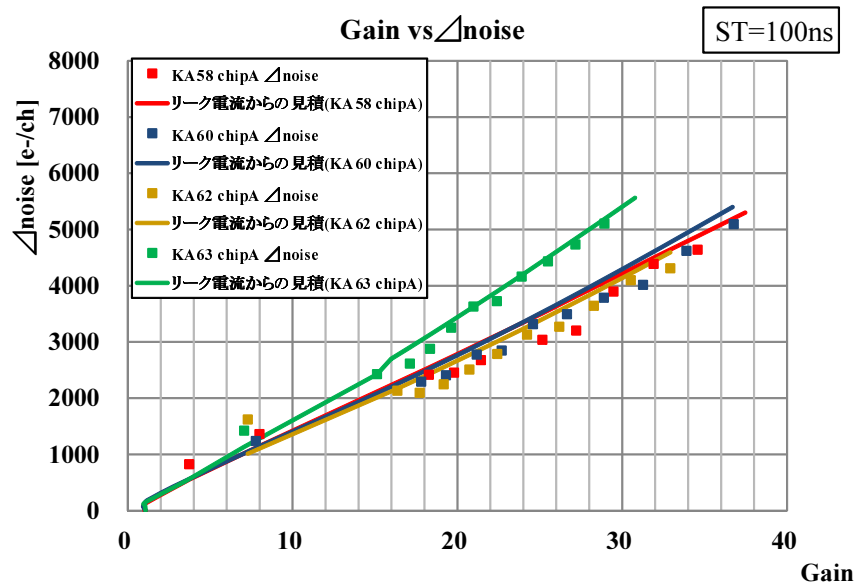


図 5.13: ノイズ増加量の見積り

プロットはピークホールド ADC で測定した際のノイズ量。実線はリーク電流が全てバルク電流と仮定した場合のノイズ量。

リーク電流測定から $10 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ 照射時のノイズ増加量は $0.025 \mu\text{A/mm}^2$ となると予測したので、この値から見積もったノイズ増加量は図 5.14 となる。この結果より Avalanche 増幅率 40, 打ち込み増幅率 1,900 の時のノイズは 7,000 e⁻ 程となり S/N は

$$S/N = \frac{40 \times 1900}{7000} \sim 10 \quad (5.3)$$

と見積もることが出来る。この結果はS/N7以上であり十分使用可能であると言える。

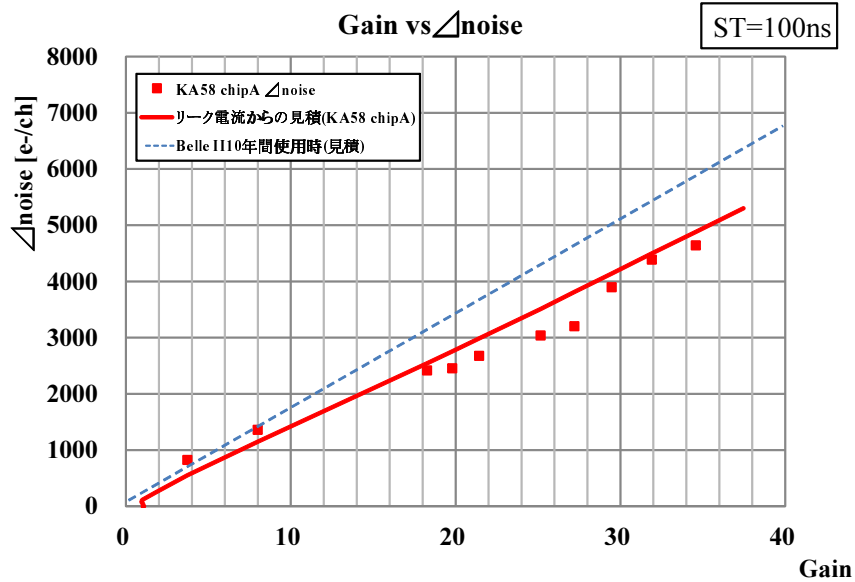


図 5.14: Belle II10年分のノイズ増加量見積り

1 光子入力時の S/N 測定

1 光子の S/N 測定は図 5.11 のセットアップで、LED 光からパルスあたり 0～数光子レベルの光を入射し HAPD の出力波高分布を MCA で取得した。HAPD には照射前に Avalanche 増幅率が 40 となるときの印加電圧をかけ、HV を -8,500 V に設定した。この時、印加電圧に 1 MΩ の抵抗がついているため、リーク電流増加により照射後は電圧低下し Avalanche 増幅率が下がる。

図 5.15～5.17 が各 HAPD の 1 光子の S/N 測定の照射前 (shaping time 100 ns), 照射後 (shaping time 200 ns, 100 ns) の ADC 分布である。各グラフ一番左のピークがペDESTAL (0 光電子に相当), その隣のピークが 1 光電子, 2 光電子と続いている。

これらのグラフから以下の式にしたがって S/N 比を求める。

$$S/N = \frac{M_{2p.e} - M_{1p.e}}{\sigma_{ped}} \quad (5.4)$$

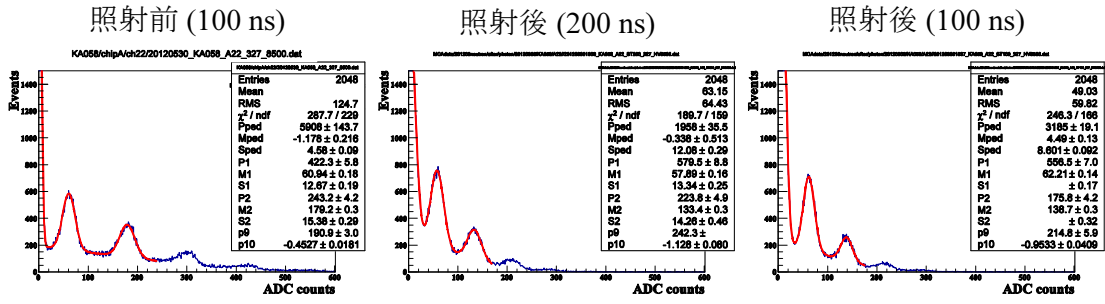


図 5.15: KA058 chipA の照射前後の ADC 分布

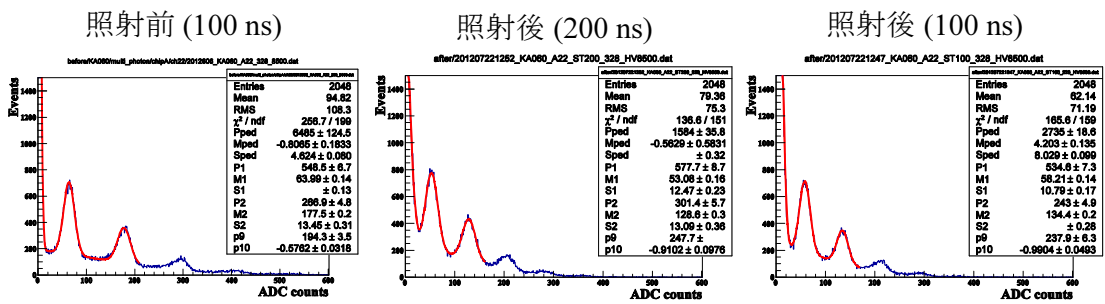


図 5.16: KA060 chipA の照射前後の ADC 分布

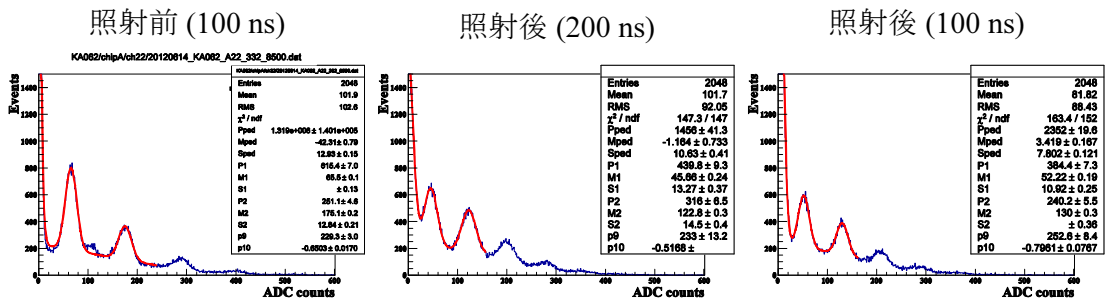


図 5.17: KA062 chipA の照射前後の ADC 分布

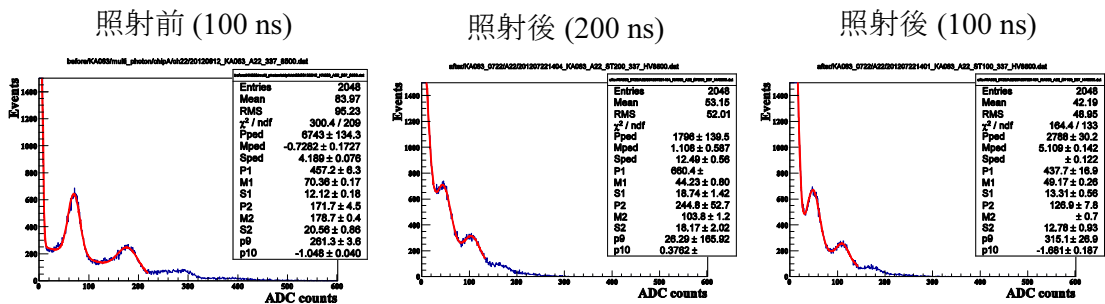


図 5.18: KA063 chipA の照射前後の ADC 分布

ここで $M_{2p,e}$, $M_{1p,e}$ は 2 光電子, 1 光電子それぞれのピークを中心値でその差が 1 光電子の波高値に相当する。 σ_{ped} はペDESTALピークをガウス分布で近似した時の偏差でこれの 1σ をノイズと定義する。これらをまとめた結果が表 5.4 である。(5.2) から Shaping time を 200 ns \rightarrow 100 ns とする事でノイズ量は $1/\sqrt{2}$ 程度減少すると予測できる。実際に照射後のノイズは $1/\sqrt{2}$ 程減少しており Shaping time 短縮の効果を確認した。この結果から KA063 以外は照射後に Shaping time を 100 ns に短縮することで S/N 比 7 程度以上を達成することが出来た。KA063 は照射量 4.8×10^{11} n/cm² で S/N 比 ~ 7 であるのでこのままでは 10 年分の耐性はないと言える。

No		照射前 100 ns	照射後 200 ns	照射後 100 ns
KA058	増幅率	54530	34956	35137
	ノイズ [e]	2111	5594	3702
	S/N	25.8	6.2	9.5
KA060	増幅率	52346	34839	35137
	ノイズ [e]	2131	5113	3702
	S/N	24.5	6.8	9.5
KA062	増幅率	50510	35710	35852
	ノイズ [e]	6006	4922	3597
	S/N	8.33	7.3	10.0
KA063	増幅率	48668	27591	28678
	ノイズ [e]	2502	5782	4203
	S/N	19.5	4.8	6.8

表 5.4: 照射前後における S/N の比較

5.3.4 中性子照射試験まとめ

本研究では最終仕様候補の HAPD に対し最大積算線量 8.6×10^{11} n/cm² の中性子照射試験を実施した。ガンマ線対策として施した中間電極は中性子耐性に影響を及ぼさない事を確認したが、予想に反して受光面膜質 C, P⁺ 層普通の HAPD は受光面膜質 C, P⁺ 層薄よりリーク電流が増大した。ノイズ測定の結果からこのリーク電流はバルク電流であるので APD 内部の欠陥であると考えられる。したがって受光面膜質の違いとは考えられない。受光面膜質 A と C の製造工程により P⁺ 層の厚さが異なるように P 層の厚さも異なっている可能性があるため、P 層と P⁺ 層の厚さを受光面膜質 A の HAPD と同様の厚さにすればリーク電流を抑えられると思われる。1 光子の S/N 測定では KA063 以外は照射後に Shaping time を 100 ns に短縮することで S/N 比 7 程度以上を達成することが出来た。

これらの結果より中性子照射試験では受光面膜質 A, P 層薄, P⁺ 層薄の HAPD を第一候補とするが最終的な判断は次節のガンマ線照射試験の結果と合わせて考察する。

5.4 ガンマ線照射試験

5.4.1 ガンマ線照射試験概要

HAPD の中性子照射試験に引き続き, 2012 年 8 月にガンマ線照射試験を実施した。照射のセットアップや照射中の測定は 4.3.1 と同様, 名古屋大学 ⁶⁰Co 照射室にて, 照射中に印加電圧を一定に保ち電流値をモニタリングする方法とバイアススキャンを一定間隔ごとに行い測定を行った。図 5.19 はセットアップの図である。照射強度は 50 Gy/hour で 20 時間, 計 1,000 Gy 照射した。またガンマ線照射試験を行った HAPD のパラメータと中性子照射線量を表 5.5 に示す。



図 5.19: ガンマ線照射試験セットアップ

表 5.5: 最終仕様候補 HAPD のパラメータと中性子線量

No	アルカリ 保護膜	受光面 膜質	P	P ⁺ 層	中間電極	中性子線量 [n/cm ²]
KA058	×	A	薄	薄	○	8.6×10^{11}
KA059					×	0
KA060					×	7.25×10^{11}
KA062					×	6.0×10^{11}
KA063					○	4.75×10^{11}

5.4.2 ガンマ線照射試験結果

照射中測定結果

ガンマ線照射中に Avalanche 増幅率 40 倍になる様に電圧を印加した際の電流測定結果を図 5.20 に示す。この結果より、アルカリ保護膜を除去したにもかかわらず増幅率 40 倍以下での周辺部ブレイクダウンが発生しているチップが存在していることが分かる。この増幅率 40 倍以下で周辺部ブレイクダウンが発生した積算線量をまとめたものが表 5.6 である。また、照射中のバイアススキャンにより積算線量と周辺部ブレイクダウン電圧との関係をまとめたものが図 5.21 である。なおこの図の一番右のプロットはガンマ線照射終了後、一度バイアスを 0 V に下げた後、バイアススキャンを行った結果であるため周辺部ブレイクダウン電圧の回復が見られる。

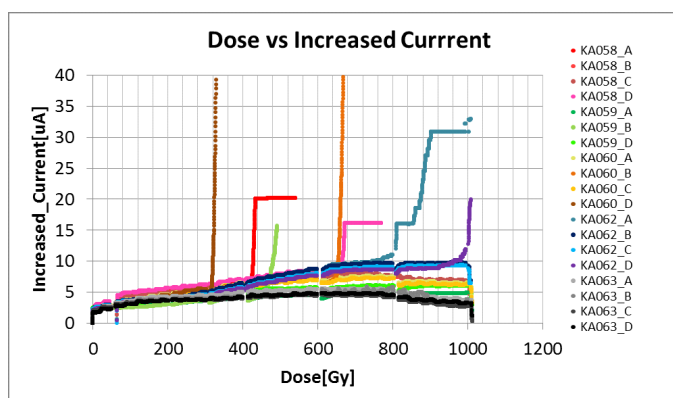


図 5.20: 照射中電流測定結果

表 5.6: 増幅率 40 倍以下での周辺部ブレイクダウン発生線量 [Gy]

	KA058	KA059	KA060	KA062	KA063
chip A	430	-	-	800	-
chip B	-	460	650	-	-
chip C	-	-	-	-	-
chip D	660	-	320	980	-

周辺部ブレイクダウンはアルカリ保護膜を除去しているにも関わらず KA058 chip B と KA063 以外の全てのチップで発生した。KA063 が他の HAPD と違うのは受光面膜質であり受光面膜質 C のタイプの HAPD は受光面膜質 A よりも耐性があると言える。また受光面膜質 A の HAPD での周辺部ブレイクダウン発生線量にはチップ間でばらつきがあることを確認した。

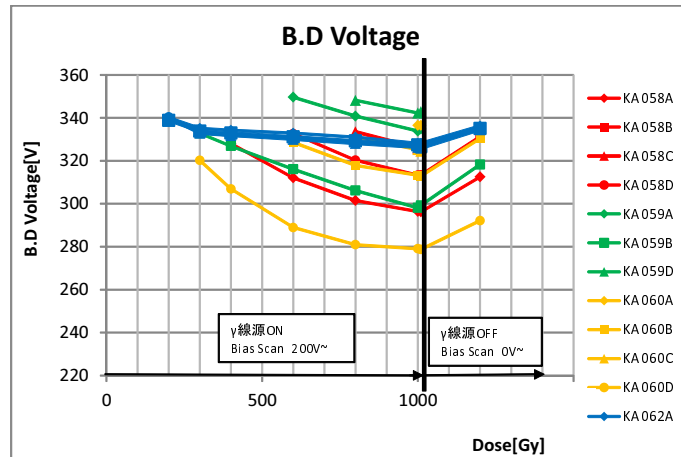


図 5.21: 照射中周辺部ブレイクダウン電圧の低下

KA059 と KA060 は同タイプの HAPD であるが KA059 は中性子未照射，KA060 は中性子照射済みの HAPD である。これらを 2 つの HAPD は共に周辺部ブレイクダウンを起こしているため中性子照射による周辺部ブレイクダウンのしやすさの変化は確認されなかった。

中間電極有無の効果は KA058 と KA062 との比較で行う。周辺部ブレイクダウンのしやすさは中間電極の有無で優位な違いは見られなかったが，電流の増加量自体は違いがあった。図 5.22 は KA058 と KA062 の周辺部ブレイクダウンを起こしていないチップの電流増加量と積算線量のグラフである。緩やかな電流の増加は中間電極有りの HAPD は無しの HAPD と比較して 1,000 Gy 照射時点で 20 % 程度低い。

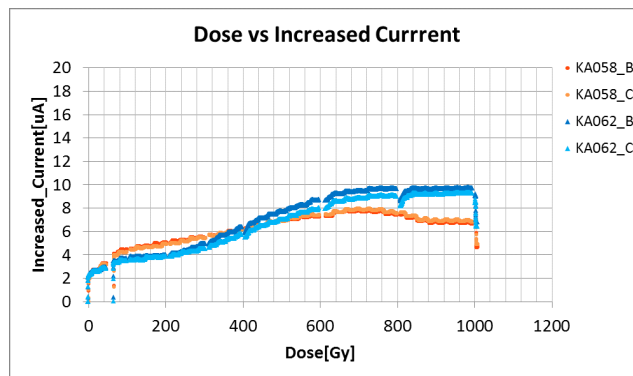


図 5.22: 中間電極有無による電流増加量の比較

照射後測定結果

ガンマ線照射後の時間経過と周辺部ブレイクダウン電圧の関係を図 5.23 に示す。照射 150 時間後までに周辺部ブレイクダウンが発生していた 14 チップのうち 9 チップは周辺部ブレイクダウンが発生しなくなり，周辺部ブレイクダウンが発生している KA058 チップ A，KA060 チップ D，KA062 チップ A，チップ B，チップ D も Avalanche 増幅率 40 倍に相当する印加電圧以上まで回復した。Belle II 実験では 1,000 Gy のガンマ線を 10 年間で浴びるため，HAPD が回復しきっている状態で周辺部ブレイクダウンが発生しなければ良い。そのため，今回照射した全ての HAPD は 10 年間の使用で動作電圧以下での周辺部ブレイクダウンが発生しないと考えられる。

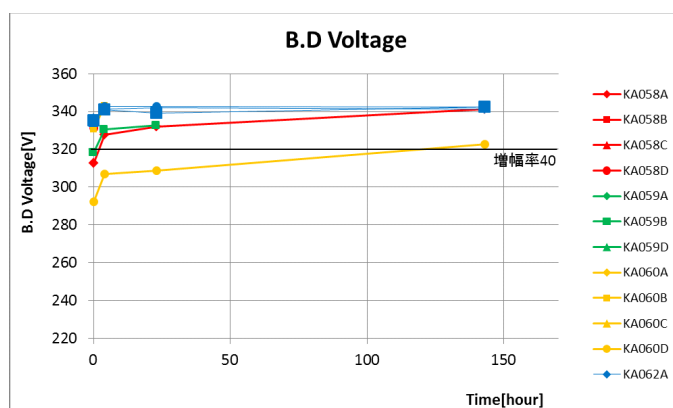
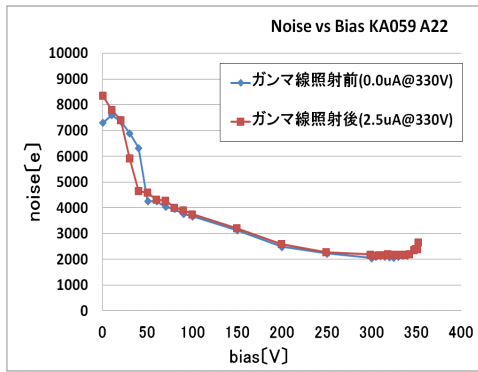


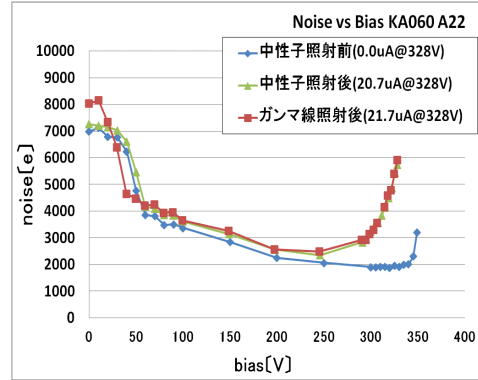
図 5.23: 周辺部ブレイクダウン電圧の回復

中性子照射の有無によるノイズ量を確認するため，KA059 と KA060 で比較を行った。この 2 つの HAPD は構造は同じもので KA059 は中性子未照射，KA060 の中性子照射量は $7.25 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の HAPD である。ピークホールド MCA を用いて測定したそれぞれの照射前後でのノイズ量を図 5.24 に示す。なお MCA の Shaping time は 100 ns に設定した。この結果よりガンマ線によるノイズ増加量は中性子と比較して十分小さいことが確認した。

144 チャンネル APD や HAPD の測定ではチップ毎で周辺部ブレイクダウンが発生する照射量の差が大きい。これは周辺部ブレイクダウンが 1 チップ 36 チャンネルのうちどれか一つでも発生するとチップとしてブレイクダウンしてしまうためであると考えられる。照射中測定では中間電極の有無により周辺部ブレイクダウンのしやすさに違いは現れなかったが，中間電極により周辺部ブレイクダウンが発生するチャンネルが少なくなる可能性があるため，KA058 と KA062 のチップ A のチャンネル電流を測定し周辺部ブレイクダウン率を見積もった。図 5.25 はその結果である。中間電極が実装されている KA058 では 1/36 チャンネルで，中間電極未実装の KA062 では 33/36 で周辺部ブレイクダウンが発生した。以上より中間電極の有無で周辺部ブレイクダウンのしやすさが変わっていると考えられる。

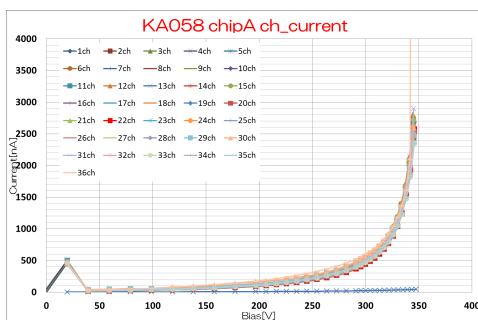


(a)KA059 のノイズ量
中性子未照射

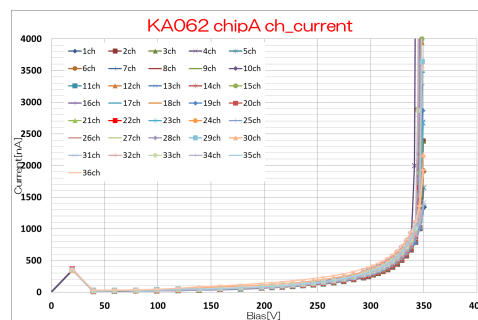


(b)KA060 のノイズ量
中性子照射量 7.25×10^{11} n/cm²

図 5.24: 照射前後のノイズ量の変化
中性子によるノイズ増加に対し、ガンマ線による影響は十分小さい。



(a)KA058



(b)KA062

図 5.25: ガンマ線照射後のチャンネル毎のリーク電流

5.4.3 ガンマ線照射試験まとめ

本研究では最終仕様候補の HAPD に対し積算線量 1,000 Gy のガンマ線照射試験を実施した。

ガンマ線による損傷は中性子損傷とは独立の現象であることを確認し、ノイズの増加量は中性子による損傷と比較して十分小さいことを確認した。受光面保護膜では膜質 C では周辺部ブレイクダウンは発生せず、膜質 A のタイプでは未だに周辺部ブレイクダウンが発生した。しかし、HAPD の損傷回復を考慮すると照射した全ての HAPD で動作電圧以下での周辺部ブレイクダウンは発生しなかった。中間電極は照射中の緩やかな電流上昇を緩和することが確認された。またチャンネルごとの周辺部ブレイクダウン発生率が中間電極有りのタイプでは小さかったため、中間電極は周辺部ブレイクダウンを抑制すると考えられる。

これらの結果より、ガンマ線対策では受光面膜質 C、中間電極有りの HAPD が最も耐性があると言える。

5.5 HAPD 量産機を選択

中性子照射試験とガンマ線照射試験の結果を加味し HAPD 量産機を選択をおこなう。中性子照射試験では受光面膜質 A、P 層薄、P⁺ 層薄の HAPD を第一候補とした。ガンマ線照射試験では受光面膜質 C、中間電極有りの HAPD が第一候補である。受光面膜質 C はガンマ線では周辺部ブレイクダウンは発生しないが、中性子照射では許容できないノイズの増加が発生する。受光面膜質 A は中性子照射ではノイズ増加量が許容範囲内であるが、ガンマ線では周辺部ブレイクダウンが発生する。しかし周辺部ブレイクダウン電圧は動作電圧以上まで回復するため量産機としては受光面膜質 A を採用する。

受光面膜質 C の HAPD は今回の照射試験では P⁺ 層普通のタイプのみでしか行っていないため、中性子照射による許容できないノイズの増加が受光面膜質とは異なる部位によるものであれば、製法の改善により使用できる可能性はある。

よって、HAPD 量産機としてアルカリ保護膜無し、受光面膜質 A、P 層薄、P⁺ 層薄、中間電極有りのタイプ (KA058 のタイプ) を採用する。また、バックアップとして製法を改善した受光面保護膜 C、P⁺ 層薄の HAPD を製作し放射線照射試験を実施する予定である。

6 A-RICH読み出しボードの開発

我々はA-RICH読み出しシステムとして読み出しボードとボードに搭載するASICである「SAシリーズ」の開発を行っている。SAシリーズでは第1, 第2バージョンとしてSA01, SA02を製作し基本的な性能を満たすことを確認した[23]。そして, 中性子損傷によるノイズを低減するため波形整形回路の時定数を短縮した最終バージョン予定であるSA03を製作し, 性能評価を行った。読み出しボードはビーム軸方向に50 mm以下のサイズに収まるSA02用読み出しボードを製作し, 基本的な性能を満たすことを確認した[23]。本章では複数の会社で製作したSA03の性能評価の結果からSA03を製作する会社を決定し, SA03を搭載したSA02用読み出しボードの性能評価, 放射線を照射したHAPDによる信号読み出しの結果を報告する。

6.1 読み出しボード搭載 ASIC

6.1.1 SAシリーズの構成

A-RICHフロントエンド読み出しシステムに搭載するASICとして我々は「SAシリーズ」を開発している。図3.13の前半部分がSAシリーズに対応するが, 詳しく書き直した構成図が6.1である。SAシリーズはHAPDからの信号を増幅器(Amp.), 波形整形器(Shaper), 粗調節と微調節のオフセット調節回路を通した後, リーディング型かゼロクロス型どちらかの比較器(Comparator)により検出判定を行う。以下にそれぞれの構成要素について説明する。

増幅器

増幅器(Amp.)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。最も増幅率の高い設定(gain0)を基準(=1)として1: 1/2: 1/3: 1/4となるように設計されている。

波形整形器

波形整形器(Shaper)は波形立ち上がり時間であるShaping time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。SA01, SA02は内部スイッチにより帰還容量を変更することによって, SA03は抵抗の切り替えによってShaping timeを切り替えることができるように設計された。Pole-Zero補償回路はアナログ出力回路のアンダーシュートを防ぐために設計された。

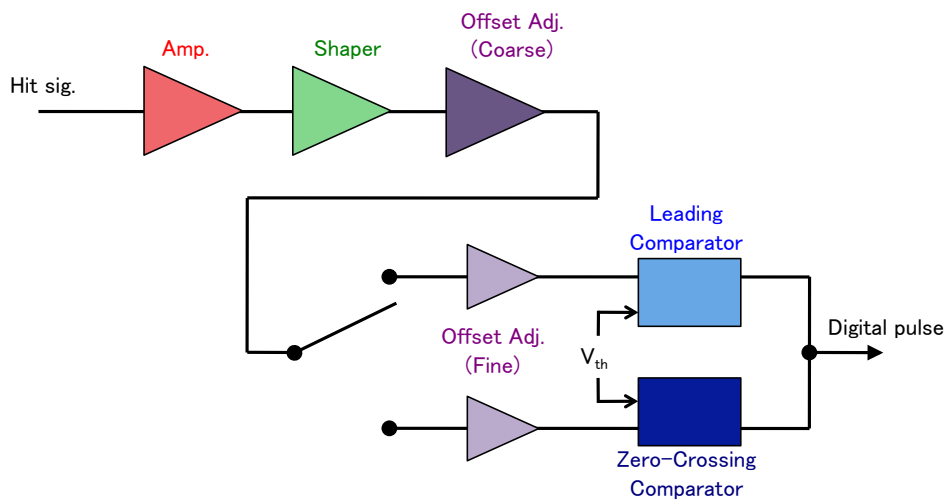


図 6.1: SA シリーズの構成図

オフセット調節回路

1 光子検出を適切に行うには各チャンネルごとに閾値電圧 (Threshold Voltage: V_{th}) を与える必要があるが、この場合、全チャンネル分の ADC が必要となるため回路規模が大きくなってしまう。そこで SA シリーズでは V_{th} は全チャンネル共通にし、各チャンネルのオフセットを調節する方式を採用した。粗調節 16 段階、微調節 16 段階の 2 段構成にすることで計 256 段階でオフセットを調節可能である。

比較器

比較器 (Comparator) は入力されたアナログ信号と閾値電圧 V_{th} を比較し、アナログ信号が V_{th} を超えている間、矩形波を出力する回路である。この矩形波を後段にある FPGA のデジタル入力として扱う。比較器はリーディング型、とゼロクロス型という 2 種類から選択することが出来る。図 6.2 に比較器の動作シミュレーションを示す [22]。同図 (a) はリーディング型のシミュレーションである。リーディング型は一般的な比較器であり、アナログ信号が閾値電圧を超えている間出力する。一方同図 (b) のゼロクロス型は、アナログ信号の微分波形 (を反転させた信号) と微分波形のベース電圧 (これを V_{th} とする) をリーディング型比較器で比較することで、元のアナログ信号がピークに達したタイミングから矩形波を出力する。入力信号のピークから出力することで、デジタル出力のタイミングが入力信号のタイミングに依存しないという特徴がある。

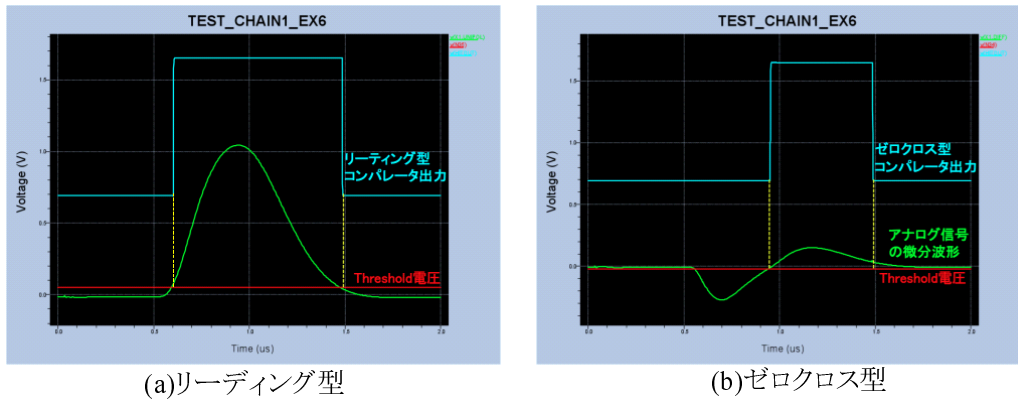


図 6.2: SA シリーズの構成図

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 等のパラメータを設定するためのデジタルスイッチング回路が備わっている。設定パラメータは全チャンネル共通の「global パラメータ」と各チャンネルに設定される「channel パラメータ」の 2 種類である。表 6.1 に設定可能なパラメータをまとめる。パラメータの名称、機能、スイッチ (SW) のビット数を表している。

SA シリーズの開発状況

SA シリーズは第 1, 第 2 バージョンとして SA01, SA02 を製作し、基本的な要求を満たすことを確認した。そこで最終バージョンとして SA03 の製作を行った。SA03 の変更点は以下の 2 点である。

- 1) Shaping time の短縮
- 2) パラメータ読み出しを非破壊方式に変更
- 3) シフトレジスタに Dual Interlocked storage Cell(DICE) を使用

1) の Shaping time の短縮は 4.1.2 節で述べたように中性子によるノイズを低減するために用いる。SA01, SA02 は内部スイッチにより帰還容量を変更することによって Shaping time の変更を行っていたが、SA03 では抵抗の切り替えにより Shaping time を変更できるようにした。設計では SA01, SA02 の Shaping time は 250, 500, 750, 1000 ns に、SA03 では 100, 110, 130, 200 ns に設定できる。

2) のパラメータ非破壊読み出し方式について記述する。図 6.3 にオフセットや Shaping time 等のパラメータの読み出し方式の概略図を示す。

表 6.1: SA シリーズのパラメーター一覧

global parameter		
parameter	機能	SW [bit]
PHASECMPS	位相補償用帰還容量の設定	2
GAIN	増幅率の設定	2
SHAPINGTIME	波形整形器の時定数 (=Saping time) 設定	2
COMPARATOR	比較器の選択	1
VRDRIVE	比較器出力回路の調整	8
MONITOR	アナログ出力位置の変更	2
ID	チップ識別子 (設定不可, 読み出し専用)	9
channel parameter		
parameter	機能	SW
DECAYTIME	増幅器出力信号の減衰時間の設定	3
OFFSET	オフセット粗調節	4
FINEADJ_UNIPOL	UNIPOL 出力 [†] のオフセット微調節	4
FINEADJ_DIFF	DIFF 出力 [‡] のオフセット微調節	4
TPENB	テストパルス入力許可選択	1
KILL	チャンネル使用許可選択	1

[†]UNIPOL 出力はリーディング型への入力に対応

[‡]DIFF 出力はゼロクロス型への入力に対応

SA02 までは同図上部の破壊読み出し方式で行っていた。これは各種パラメータを読み出す際に、同じパラメータを書き込みレジスタに記憶されている値を押し出すことで読み出しを行っている。この方式だと読み出す際のパラメータ書き込み時間がデッドタイムになってしまう。実験中は飛来した中性子等によりラッチ内の値が変化してしまう Single Event Effect(SEE) という現象が起こり得るため、定期的に ASIC に設定したパラメータを読み出して確認する必要がある。しかし破壊読み出し方式を用いると、パラメータを読み出すたびにデッドタイムが生じてしまう。

そこで SA03 では図 6.3 下部の様にシフトレジスタを 2 本に増やし、1 本はデータ保持用レジスタとしてパラメータを保持し、パラメータを読み出す際には出力用レジスタにパラメータをコピーし読み出すことでデッドタイムが生じることなくパラメータの読み出しができる。この方式を非破壊読み出し様式と呼ぶ。

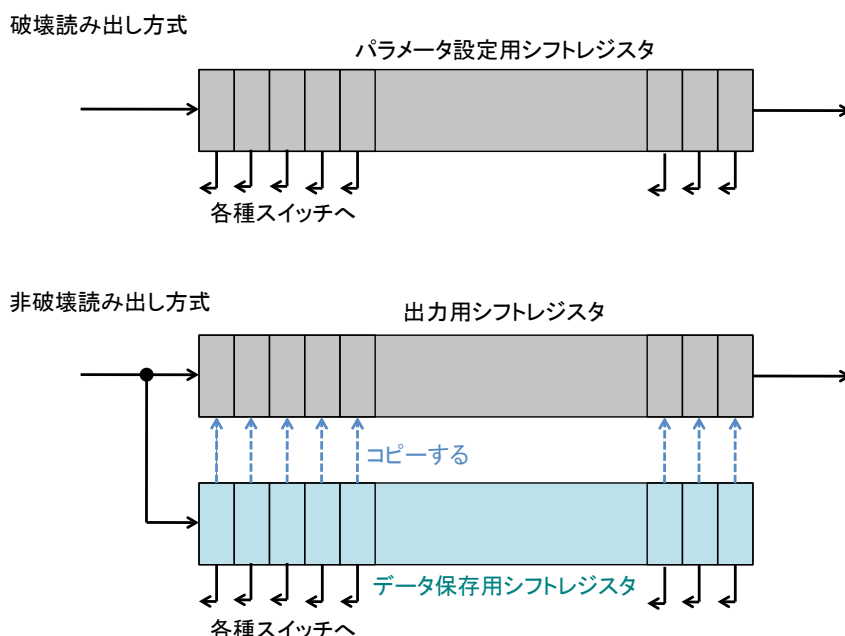


図 6.3: コントロールレジスタの読み出し方式

3) の DICE とは 1 つのパラメータを保持する際 2 ビット使用し、SEE により片方のラッチ内の値が変化した場合でも元に戻る様な仕組みになっている。通常のラッチ回路は図 6.4(a) の様に 2 つのインバータから成り立っているため SEE による異常信号が正帰還により保持されてしまう事がある。一方、図 6.4(b) の DICE ではデータを 2 か所で保持することで、SEE による異常信号が生じた場合でも修正し元のデータを保持することが出来る。

上記 3 つ以外、増幅率等の値は SA02 から変更はない。表 6.2 にシミュレーションによる SA03 の機能を記す [23]。

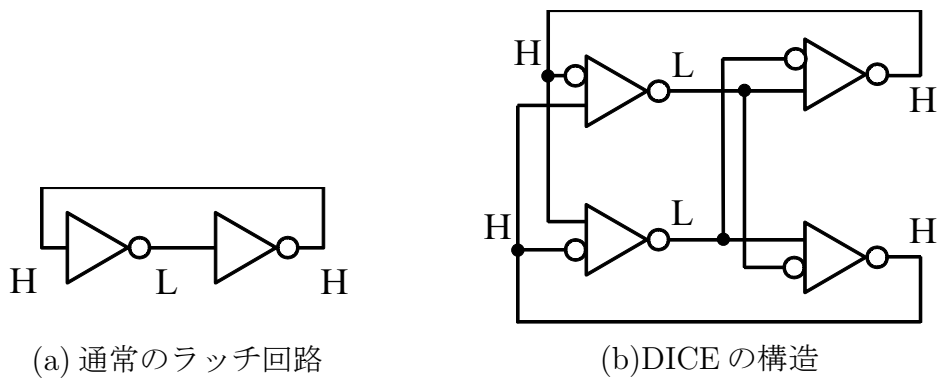


図 6.4: DICE の仕組み

(a) は通常のラッチ回路である。SEE が生じるとその値を保持してしまう事がある。(b) は DICE の構造。パラメータを 2 ビットで保持することにより一方で SEE が生じても値を修正することが出来る。

表 6.2: SA03 のシミュレーション結果

増幅率	20, 26, 36, 61 mV/fC
Shaping time	100, 110, 130, 200
オフセット調節範囲	600 mV
オフセット粗調節	40 mV/STEP
オフセット微調節	2.8 mV/STEP
ノイズ量 (80 pF の検出器容量装着時)	1,100~1,400 e ⁻

上記の機能を持つSA03を台湾のTSMC社[18]とドイツのX-FAB社[19]に製作を依頼した。本章では両社それぞれで製作したSA03の性能評価を行い本実験で使用するSA03を決定した。

6.1.2 SAシリーズのパッケージ

SAシリーズはQuad Flat Package(QFP)とLow Temperature Co-fired Ceramics(LTCC)と呼ばれる2種類のパッケージで試作が行われている。QFPは一般的な表面実装型ICパッケージの1種であり、矩形外装の4辺から端子が出ている形となる。QFPは4辺への配線のためパッケージサイズが大きくなるが、製作が容易で比較的成本がかからないため、初期の数個の試作においてQFPを採用した。一方でLTCCパッケージは配線パターンを表層、内層に形成できるため多層化が可能であり、外装裏面からの端子による実装により周囲にリードが張り出さず実装面積を小さくすることができる。かつ外部基板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の集積化が可能であり、より良いノイズ耐性を得ることができる。図6.5はSA03のQFP、LTCCパッケージである。Belle II実験では実装面積が小さいLTCCパッケージのSA03を使用する予定である。我々はTSMC製SA03 QFPを試作し、非破壊読み出し機能の確認と基本的な性能を満たすことを確認した[23]。そこでTSMC製SA03 LTCCを製作し、パッケージを変更することにより配線間にできる静電容量であるストレイキャパシタンス等による影響がないかを確認するため性能評価を行った。またX-FAB製SA03 QFPも製作しTSMCとの比較を行った。

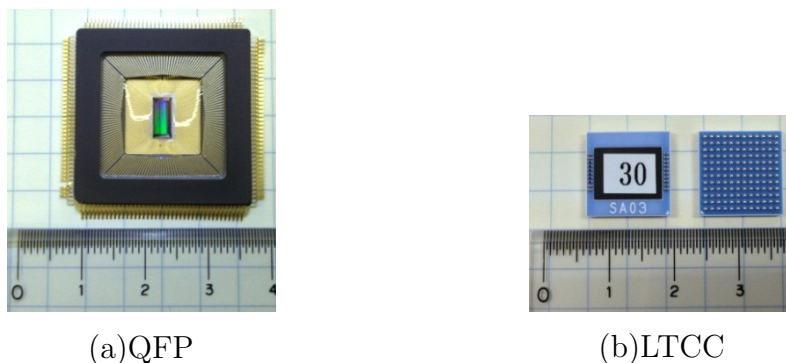


図 6.5: ASIC パッケージ

(a) のパッケージが QFP で中心部にある長方形の部分が SA03 のベアチップである。(b) は LTCC

6.2 SA03 性能評価

6.2.1 セットアップ

SA03 の性能評価は図 6.6 のテストボードを用いて行った。テストボードとは SA シリーズのテストのためのソケットと FPGA が実装されたボード本体である。このボードは QFP 用ソケットが付いたものと LTCC 用ソケットが付いたものと 2 種類あり、測定する ASIC によりボードを変更する。このボードを用い図 6.7 のようなセットアップで測定を行った。トリガー信号はファンクションジェネレータから生成した信号を、PTS を通して LVDS ロジックに変換しテストボードに送る。また閾値電圧を外部の DAC から入力し、テストパルス入力をファンクションジェネレーターを用いて外部から入力する。また、Supply board より図 6.7 のテストボードの右端上のフラットケーブル端子に SA03 用のアナログ電源 ($\pm 1.65\text{ V}$)、閾値電圧、テストパルスを入力し、中央の端子に FPGA 用の電源電圧 ($+3.3\text{ V}$) が供給される。下の端子はデジタル信号の入出力である。この端子からヒット信号をデータ収集用 VME モジュールによって送信する。またデジタル信号のノイズ対策のためロジックレベルを差動によるシステムである LVDS とした。このセットアップを用いて SA03 の測定を行った。

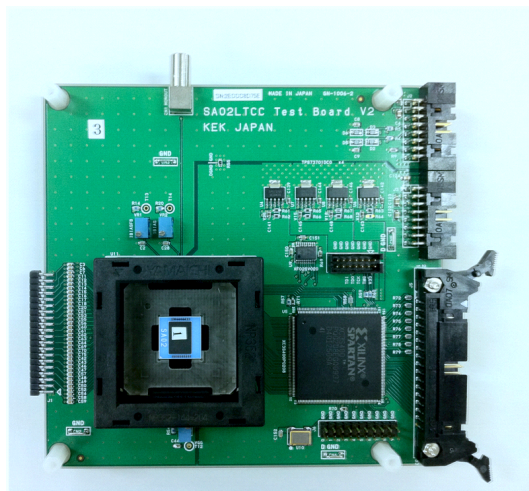


図 6.6: テストボード

6.2.2 性能評価項目

SA03 の測定は以下の項目を行った。測定結果を SA03 のシミュレーションと以前測定した TSMC 製 SA03 QFP との結果と比較を行い、本実験で使用する SA03 を決定した。

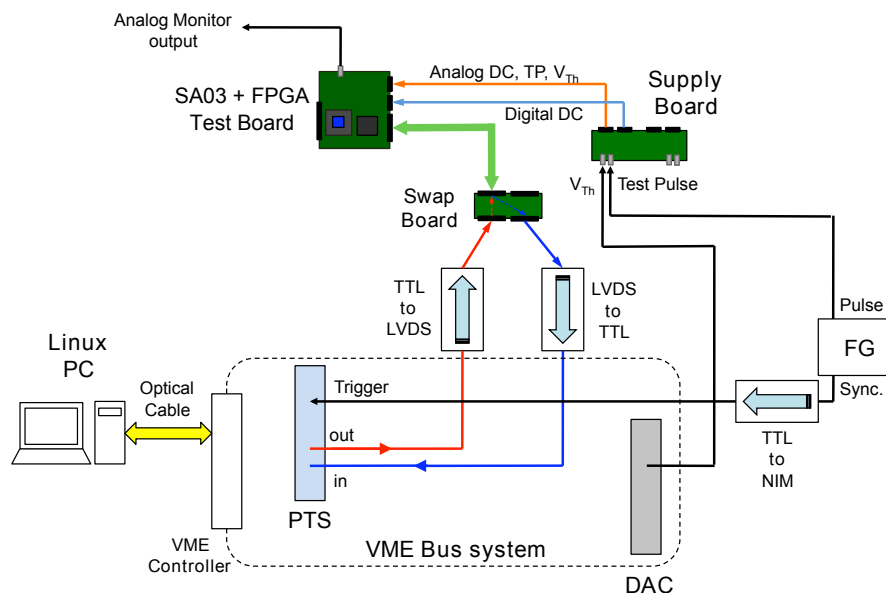


図 6.7: 性能評価セットアップ

- オフセット調節
- 増幅率測定
- ノイズ量測定
- Shaping time の測定
- 不良チャンネルの確認

6.2.3 性能評価方法

3.2.3 で説明したように ASIC は HAPD からのアナログ信号を増幅、整形した際の波高値が閾値電圧より高ければヒットとみなしデジタル値の検出信号を出力するため、直接アナログ波形の波高値などの情報を得る事はできない。そのためデジタル信号から波高値等の情報を得るために Threshold scan という方法を用いる。以下に Threshold scan の方法を示す。

1. 閾値電圧 V_{th} を初期値 th_0 に設定
2. トリガーを一定数 (nevent) を入力し、アナログ出力が何 event V_{th} を超えたかを計測する。
3. V_{th} を dth 変更する

4. (2), (3) を nth 回繰り返す

th_0 , $nevent$, dth , nth は測定により変更する。

次に解析方法を説明する。図 6.8 は Threshold scan の概念図である。左側の波形は比較器に入力される直前のアナログ信号であり、右側はアナログ信号の Threshold scan 結果のヒストグラムである。同図 (a) は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 Gauss 分布に従うため、ヒストグラムは Gauss 関数で近似できる。ピークを中心値 μ はそのチャンネルのオフセットであり、標準偏差 σ をノイズの波高値と定義し、等価電圧を得る。同図 (b) はテストパルスの様な理想的なパルス信号が入力された結果である。ノイズがほとんど無い場合、ヒストグラムは図のように矩形になり V_{th} の低い μ_{ofs} がオフセット電圧、高い方の μ_{sig} がパルスの最大値である。したがって μ_{sig} から μ_{ofs} を引くことで波高値を求めることが出来る。この矩形を近似するにはガウス分布を積分した関数である (相補) 誤差関数 $erfc(x)$ と呼ばれる次の関数を使用する。

$$erfc(x) = 1 - erf(x) = \frac{2}{\sqrt{x}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dx \quad (6.1)$$

実際にノイズが入る場合は同図 (c) の様になる。この場合はヒストグラムの部分を Gauss 関数で近似し、ピーク部分を (相補) 誤差関数 $erfc(x)$ で近似することでノイズ、波高値を見積もる。

6.2.4 性能評価

オフセット調節

オフセットを適切に調節することを確認するために測定を行った。祖調節、微調節共に 16 段階、計 256 段階に変更でき、設計では祖調節で 40 mV/STEP、微調節で 2.8 mV/STEP 毎にオフセット調節が出来る様にした。オフセットを 1 段階ずつ変更し Threshold scan を行うことでオフセット値を求めた。QFP の測定では祖調節 65 mV/STEP、微調節 5.2 mV/STEP であった。

図 6.9 に TSMC 製 LTCC、図 6.10 に X-FAB 製 QFP の測定結果を示す。TSMC 製 LTCC は祖調節 65 mV/STEP、微調節 5.0 mV/STEP となり QFP の結果とほぼ変わらない値となった。設計値より大きくなってはいるが微調節のダイナミックレンジは祖調節の 1 STEP あたりのレンジをカバーしており、制度として 5 mV 程度あれば十分である。X-FAB 製 QFP は祖調節 41 mV/STEP、微調節 3.0 mV/STEP となりシミュレーションと同等の結果となった。しかし X-FAB 製の SA03 には図 6.11 の様に 1 チップのうち数チャンネル線形性が保たれていないチャンネルがあった。しかし Belle II 使用時は各オフセットの値を記録しておくことで問題なくオフセット調節できると考える。よってオフセット調節機能は TSMC, X-FAB 共に要求性能を満たすことを確認した。

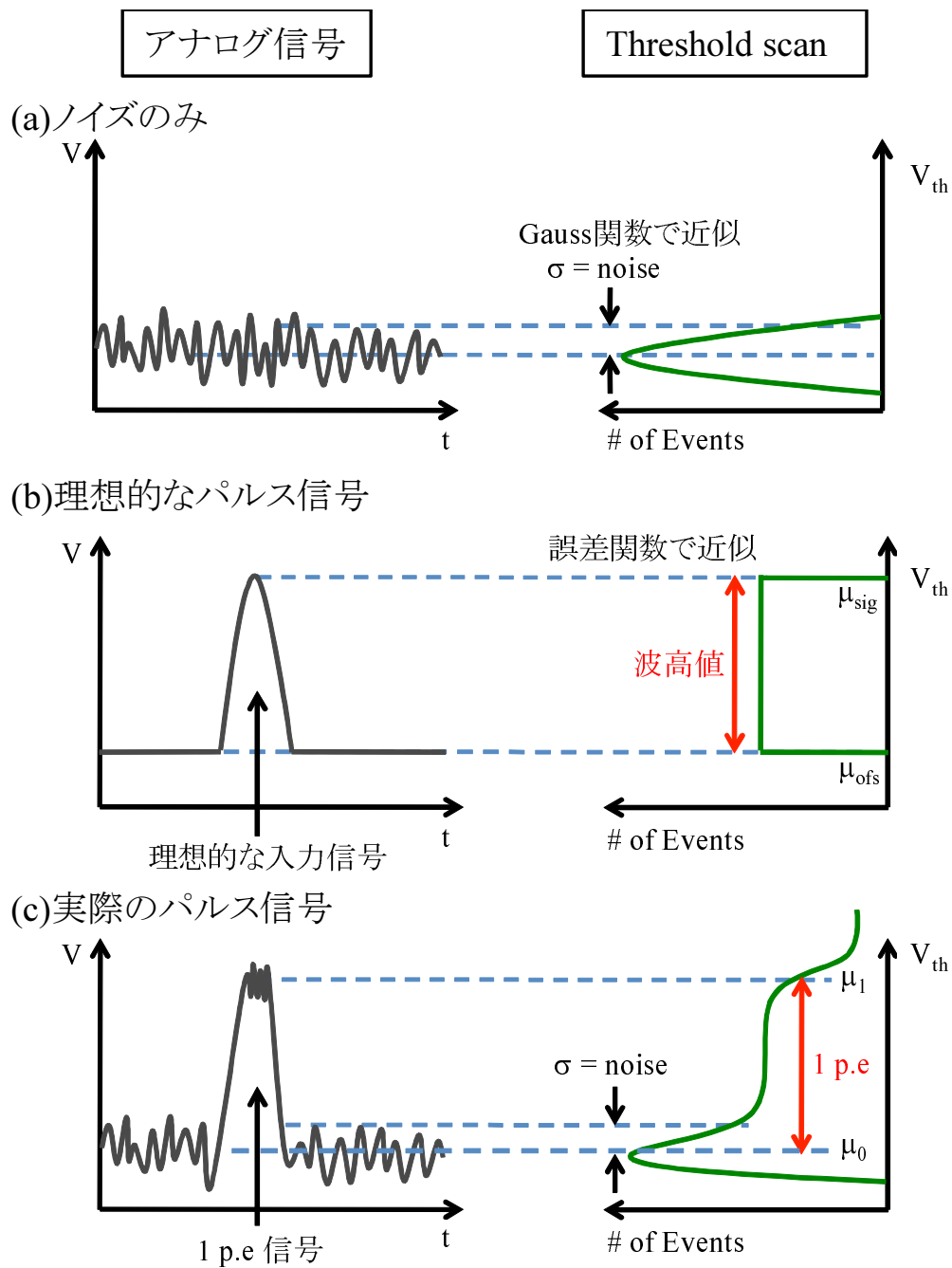
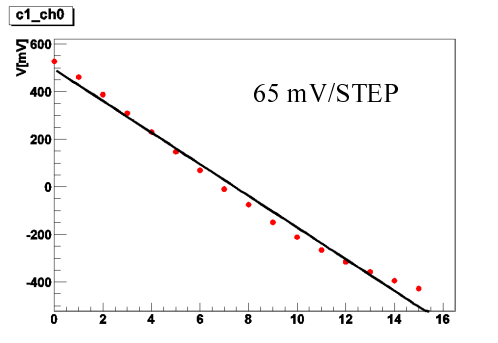
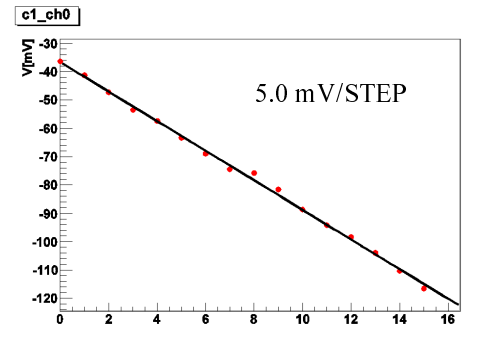


図 6.8: Threshold scan 解析方法概略図

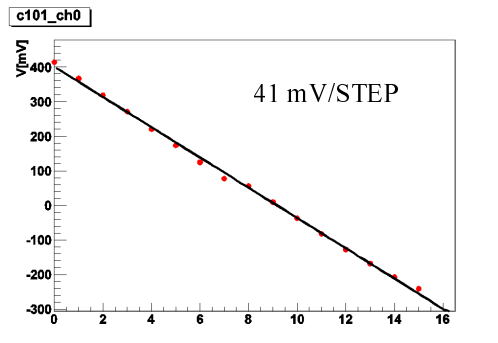


(a) 粗調節

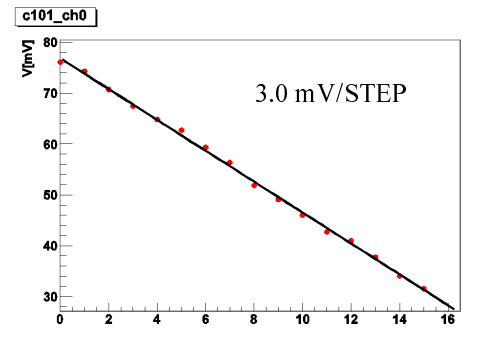


(b) 微調節

図 6.9: TSMC 製 SA03 LTCC でのオフセット調節



(a) 粗調節



(b) 微調節

図 6.10: X-FAB 製 SA03 QFP でのオフセット調節

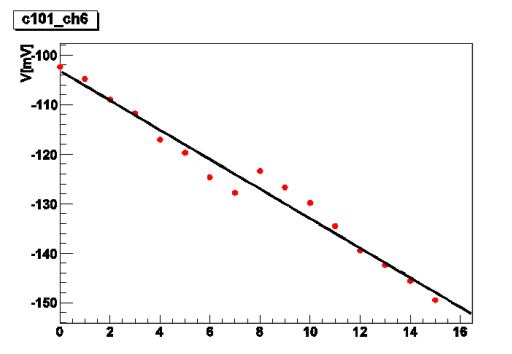


図 6.11: X-FAB 製 QFP の微調節結果
1 チップのうち数チャンネル線形性が保たれていない。

増幅率の測定

SA シリーズの増幅器は電荷有感型であるため、入力電荷量と波高値の関係から増幅率を求めた。SA03 の増幅率は最大ゲインを基準として、1: 1/2 : 1/3 : 1/4 に設計されており、ゲインをその比に設定できること、および HAPD1 光子信号相当 ($8 \text{ fC} \sim 50,000 \text{ e}^-$) までダイナミックレンジを確保できることを確認するため、測定を行った。テストボードの回路には図 6.12 の様に入力信号に 0.1 pF の容量を通すことでテストパルスの波高値を電荷量に換算できる回路となっている。本測定ではテストパルスの入力を 20 mV から 200 mV まで変化させながら Threshold scan を行い波高値を求め、入力電荷と波高値の関係から増幅率を求めた。

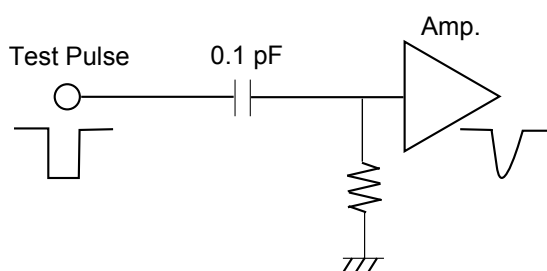


図 6.12: テストパルス入力

SA03 の設計値は $61, 36, 25, 20 \text{ mV/fC}$ 、TSMC 製 QFP での測定結果は $57, 29, 20, 16 \text{ mV/fC}$ であった。図 6.13 に TSMC 製 LTCC、図 6.14 に X-FAB 製 QFP での結果を示す。TSMC 製 SA03 LTCC での増幅率は $56, 28, 20, 16 \text{ mV/fC}$ 、X-FAB 製 SA03 QFP での増幅率は $56, 31, 22, 17 \text{ mV/fC}$ となった。これらは設計値、TSMC 製 QFP と同程度になっている事を確認し十分なダイナミックレンジを持っていることを確認した。

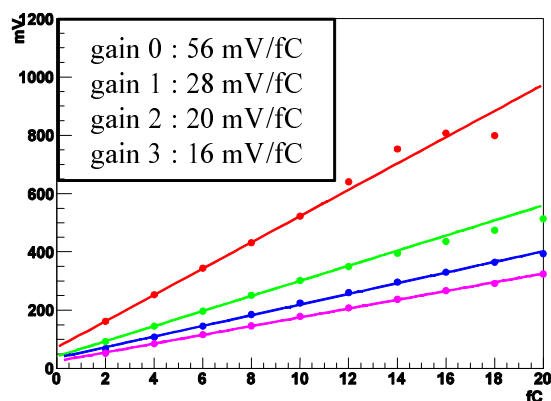


図 6.13: TSMC 製 SA03 LTCC での増幅率

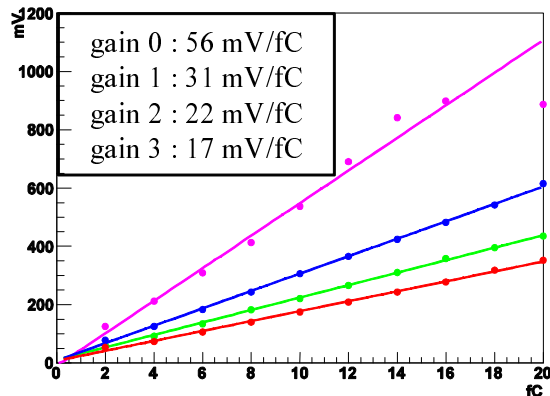


図 6.14: X-FAB 製 SA03 QFP の増幅率

ノイズ量測定

HAPD からの信号は $\sim 50,000 e^-$ であることから, SA03 単体でのノイズ量は $5,000 e^-$ 以下である必要がある。本測定はテストパルスを入力せずに Threshold scan を行うことでノイズを求めた。またテストボードに HAPD にバイアスを印加した際の容量相当である 80 pF の疑似容量を接続して行った。SA03 は $2,000 e^-$ 程度となるようにに設計されている。ASIC の増幅率は最少の設定で行った。TSMC 製 QFP でのノイズ量測定結果は $3500 e^-$ であった。図 6.15 は TSMC 製 LTCC, 図 6.16 は X-FAB 製 QFP の結果である。この結果より TSMC 製 LTCC では平均 $4,200 e^-$, X-FAB 製 QFP では平均 $3,100 e^-$ となった。設計値と比べてノイズが大きいのは SA03 を固定する際にソケットを用いているためノイズが増加していると考えられる。実際に SA02 等の ASIC の測定ではボンディングすることにより $1,000 \sim 2,000 e^-$ 程度減少している。

次に疑似容量を 10 pF から 220 pF に順次変更しノイズを測定し疑似容量とノイズの関係性を調べた。図 6.17 が TSMC 製 LTCC, 図 6.18 が X-FAB 製 QFP の結果である。このフィッティングの傾きが (4.2) の増幅器定数 A に相当する。設計では SA03 の増幅器定数は $A \sim 20 e^-/\text{pF}$ であり, TSMC 製 QFP での測定ではこの傾きは $19 e^-/\text{pF}$ であった。TSMC 製 LTCC では傾きは $25 e^-/\text{pF}$, X-FAB 製 QFP では $16 e^-/\text{pF}$ となった。これらの変化では大きな影響はないと考えられるためノイズは許容範囲内であると言える。

Shaping time の測定

Belle II 実験 10 年分の中性子によるノイズの増加を低減するために Shaping time が最適値 ($100 \sim 200 \text{ ns}$) になっているか確認を行った。Shaping time は波高値から求める事はできないため, Threshold scan は行わず, 1 光子相当である 8 fC のテス

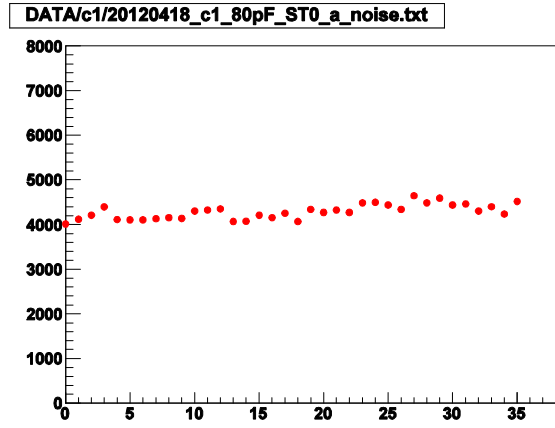


図 6.15: TSMC 製 LTCC 各チャンネルのノイズ量

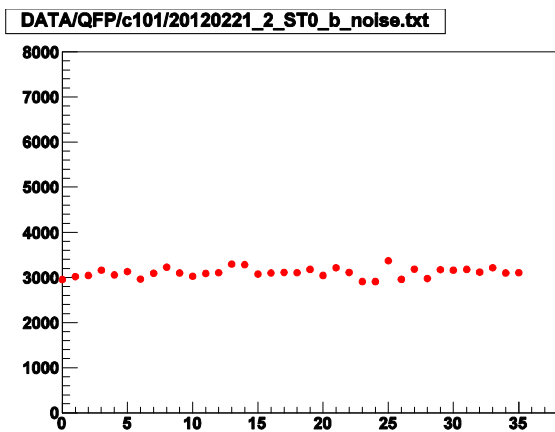


図 6.16: X-FAB 製 QFP 各チャンネルのノイズ量

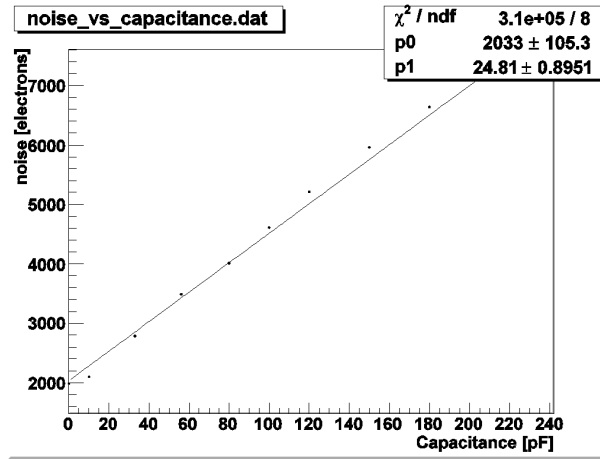


図 6.17: TSMC 製 LTCC 疑似容量とノイズの関係

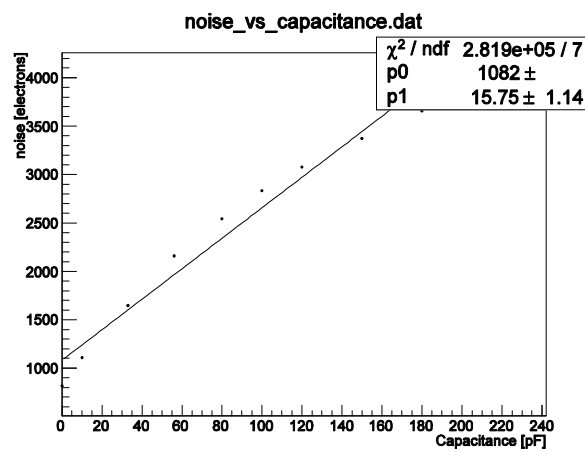


図 6.18: X-FAB 製 QFP 疑似容量とノイズの関係

トパルスを入力し、アナログ出力をオシロスコープで確認する事で測定を行った。Shaping time の定義は信号の立ち上がりからピークに達するまでの時間である。

SA03 は Shaping time を 4 段階に設定できそれぞれ 100, 110, 130, 200 ns となるように設計された。TSMC 製 QFP の測定の結果は 170, 210, 270, 410 ns であった。

TSMC 製 LTCC での測定結果を図 6.19 に、X-FAB 製 QFP の測定結果を図 6.20 に示す。TSMC 製 LTCC の結果は 170, 210, 270, 400 ns となり、X-FAB 製 QFP は 170, 210, 240, 350 ns となり TSMC 製 QFP と同等の結果となった。設計値と比較して Shaping time は大きい値となったが 100 ~ 200 ns 範囲内に設定できる事を確認したため要求性能を満たしていると考ええる。

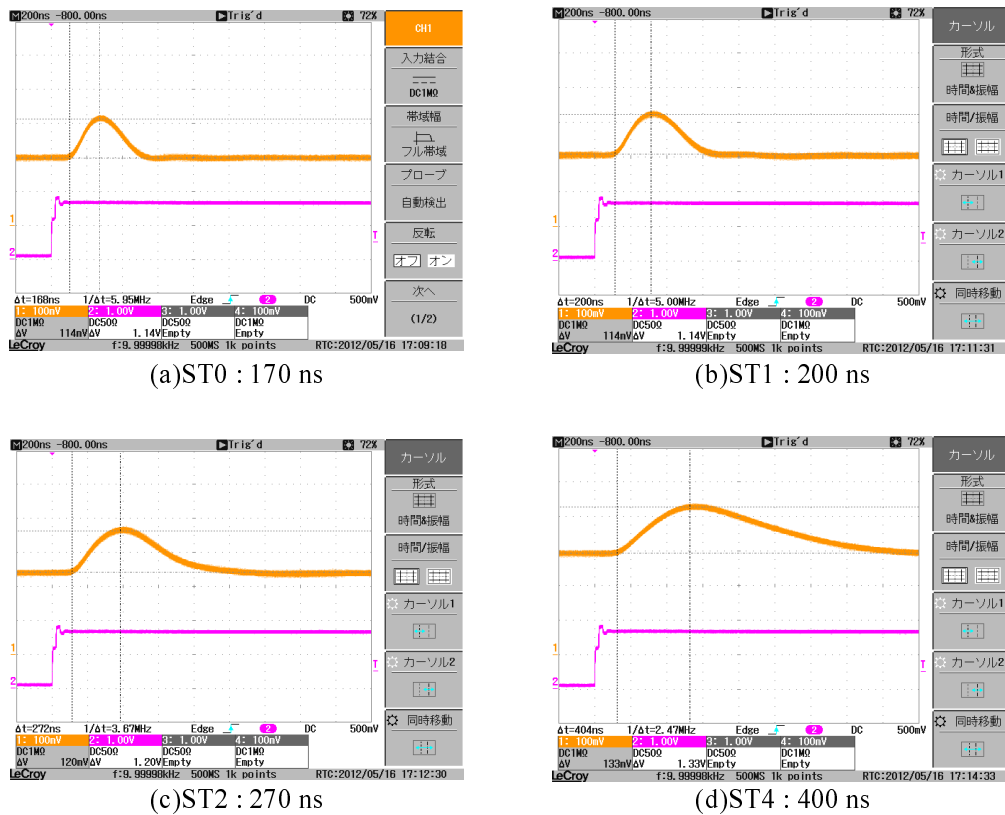
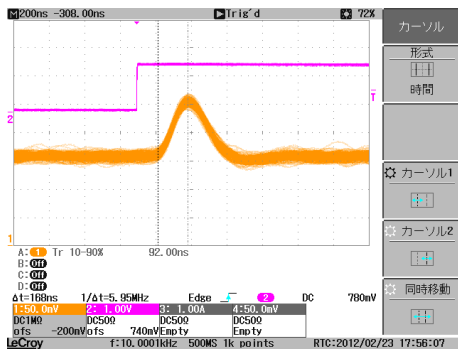


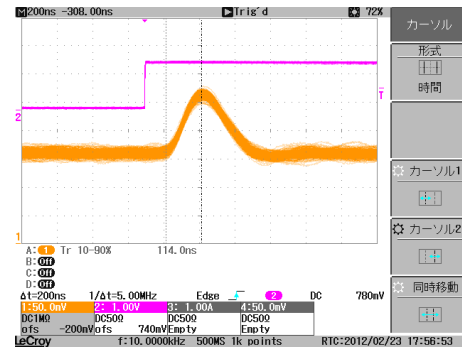
図 6.19: TSMC 製 LTCC の Shaping time

不良チャンネルの確認

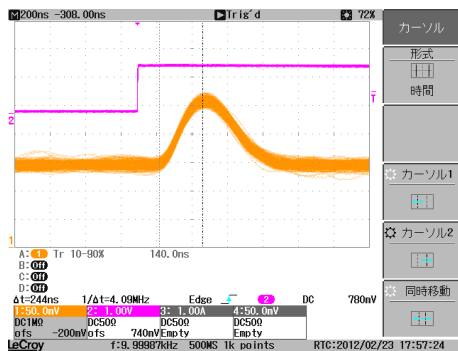
SA03 LTCC の不良チャンネルについて調査した。測定は 80mV の波高値のテストパルスを入力し、Threshold scan を用いて行った。図 6.21 は 1 チップの Threshold scan の結果である。不良チャンネルとしては、信号が出力されないチャンネルや、



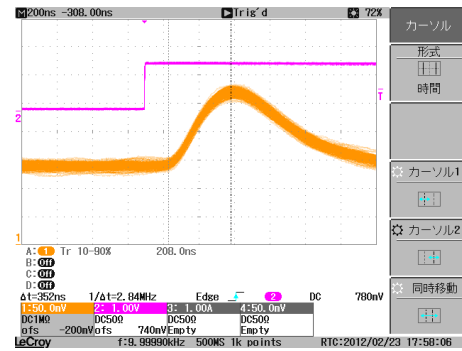
(a)ST0 : 170 ns



(b)ST1 : 200 ns



(c)ST2 : 240 ns



(d)ST4 : 350 ns

図 6.20: X-FAB 製 QPF の Shaping time

図 6.21 右にある様な出力が安定しないチャンネルが挙げられる。このようなチャンネルが多数存在すると S/N 比が低下してしまう。

不良チャンネル測定として TSMC 製 LTCC, X-FAB 製 QFP 共に 25 チップの測定を行った。1 チップ 36 チャンネルなので全 900 チャンネルである。TSMC 製 LTCC の不良チャンネルは各チップ 0 ~ 2 チャンネルで、25 チップで 19 チャンネル存在し、不良チャンネル率は 2 % 程であった。X-FAB 製 QFP の不良チャンネルは各チップ 0 ~ 2 チャンネルで、25 チップで計 4 チャンネル有り、不良チャンネル率は 0.4 % 程であった。どちらの ASIC も不良チャンネル率は十分小さいためデータ読み出し時には加重平均等で補正を行うことにより S/N 比の低下を防ぐことが出来る。

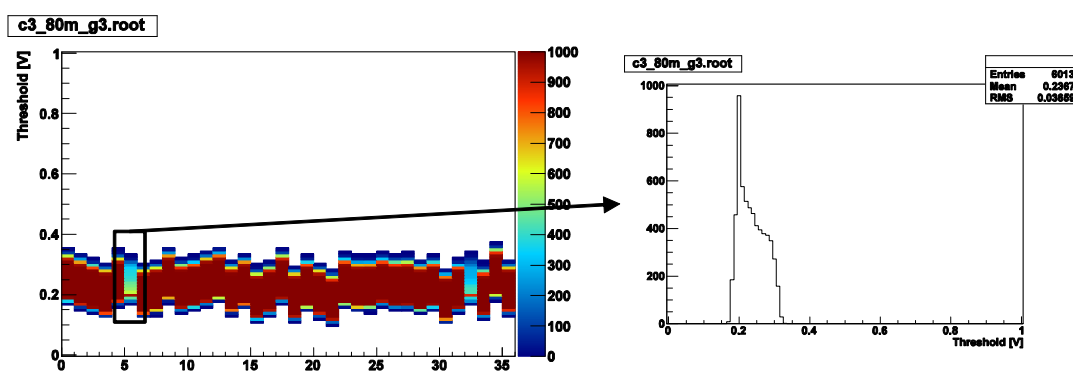


図 6.21: 80 mV のテストパルスを入力した際の Threshold scan 結果
右図は出力が安定しないチャンネル。健康なチャンネルの場合、矩形となる。

6.2.5 SA03 の選択

TSMC, X-FAB で製作された SA03 から Belle II 実験時に使用する SA03 を選択する。TSMC 製の SA03 ではオフセット調節, 増幅率, ノイズ量は要求性能を満たしていると言える。shaping time は設計値より大きい値となったが 100 ~ 200 ns 範囲内に設定できることを確認した。また不良チャンネル率も 2 % 程と十分小さい値であることを確認した。X-FAB 製 QFP では増幅率, ノイズ量は要求性能を満たしており, オフセット調節では微調節の線形性が保たれていないチャンネルもあったが各オフセットの値を記録しておくことで正しくオフセット調節ができると考えられる。shaping time は TSMC 製 LTCC と同等の値であることを確認した。不良チャンネル率も 0.4 % 程と十分小さい値であることを確認した。

X-FAB 製の SA03 は未だ LTCC での性能測定は行われていないが, TSMC 製 SA03 では QFP と LTCC に大きな違いは確認されなかったため LTCC でも同等の性能が期待できる。また検出効率に直結する不良チャンネルが 0.4 % 程と TSMC

製の SA03 と比較しても十分に小さく，製造費用も X-FAB 製 SA03 の方が少ないため Belle II 実験では X-FAB 製 SA03 を採用する。

6.2.6 SA03 性能評価まとめ

SA03 は TSMC，X-FAB という 2 会社で QFP，LTCC とする 2 種類のパッケージで試作が行われており TSMC 製 QFP では要求性能をほぼ満たすことを確認していた。本研究では TSMC 製 LTCC，X-FAB 製 QFP を製作し性能評価を行い，Belle II 実験で使用する SA03 を決定した。TSMC 製，X-FAB 製共に要求性能をほぼ満たしていることを確認したため，不良チャンネル率も 0.4 % 程で製造費用も小さい X-FAB 製の SA03 を使用する事を決定した。

6.3 読み出しボード

ASIC と FPGA を搭載した読み出しボードの開発も行われている。はじめに SA シリーズ第 1 バージョンの SA01 が搭載された読み出しボードを製作した。図 6.22 は SA01 読み出しボードの写真である。SA01 は 1 チップあたり 12 チャンネル信号処理機能を持っているため，この読み出しボードには SA01 を 3 チップ搭載し 1 つの HAPD につき 4 台の読み出しボードを用いて信号処理を行っていた。このボードを用いて KEK の富士テストビームラインで行った電子ビームテストでは K/π 識別の目標値 4σ を超える 6.7σ でできたため，読み出しボードは基本的な要求性能を満たしていると言える。しかし読み出しボード 1 台の大きさが約 15 cm で，かつ 1 つの HAPD に対し読み出しボード 4 台が必要であった。読み出しシステム領域は 50 mm であるので読み出しボードを小型化する必要があった。

そこで試作した小型化ボードが図 6.23 の SA02 読み出しボードである。ASIC は SA02 を開発し，1 チップあたり 12 チャンネルの信号処理機能から 36 チャンネルに増え，さらに LTCC パッケージを用いることで ASIC の小型化を行った。この ASIC を 1 台の読み出しボードに 4 つ接続することで 1 台で 1 つの HAPD の信号読み出しを可能にした。図 6.23(a) が HAPD と読み出しボードの接続面であり 4 チップの SA02 が搭載されている。同図 (b) はその裏面であり，144 チャンネル分のヒット信号のデジタル処理を行う FPGA が搭載されている。読み出しボード単体のテスト等をする場合，読み出しボードに同図 (c) のサブボードを装着する。サブボードには Ethernet コネクタが付いており，SiTCP 通信を用いて DAQ や ASIC のパラメータ設定などが行えるようになっている。Belle II 実験では Ethernet 通信による DAQ，パラメータ設定は行わないためサブボードは使用しない。そのため Belle II 実験時には新たに読み出しボードを製作する。図 6.24 は実際に HAPD に SA02 読み出しボードとサブボードを接続した図である。

SA02 読み出しボードは DAC が搭載されているため内部で閾値電圧の設定や，温度センサーにより ASIC や FPGA 付近の温度の測定ができる。このボードの性

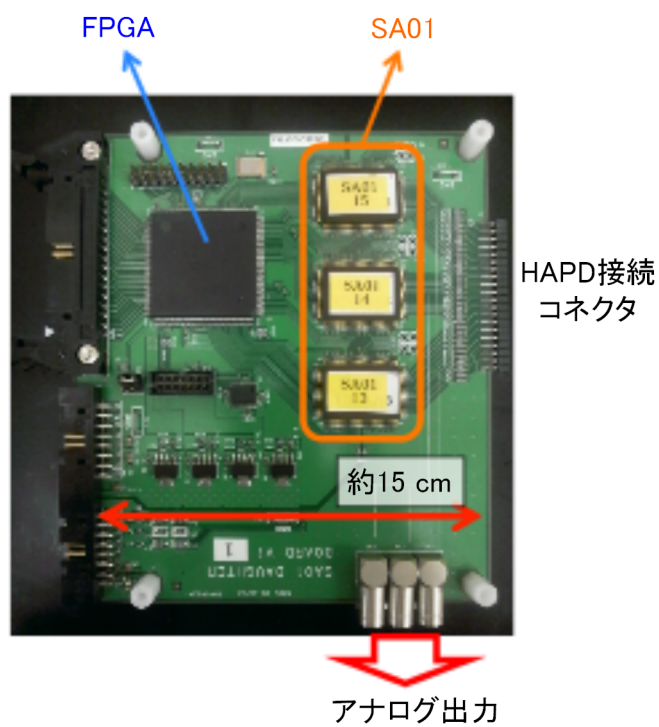


図 6.22: SA01 を搭載した読み出しボード
この読み出しボード4台で1つの HAPD の信号処理を行う。

能測定の結果，閾値電圧は $-1.25 \text{ V} < V_{th} < 1.25 \text{ V}$ の範囲で 2.4 mV 毎に設定可能であり，ヒット信号の読み出しに成功した [23]。

LTCC の SA02 と SA03 はサイズや信号処理チャンネル数，各端子への配線等の変更がないためこの読み出しボードの ASIC を SA03 に付け替えることができる。Belle II 実験用の X-FAB 製 SA03 LTCC は未だ製作されていなかったため TSMC 製 SA03 を実装し SA03 と読み出しボードの総合的な評価を行った。

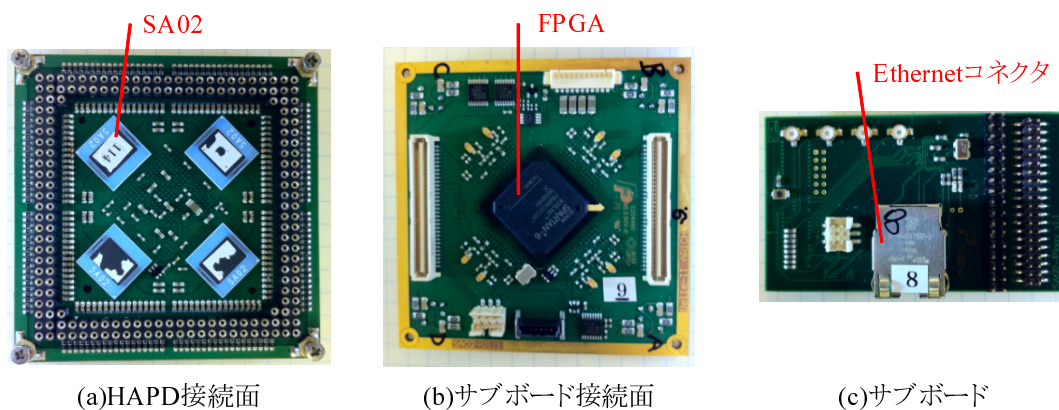


図 6.23: SA02 を搭載した読み出しボード

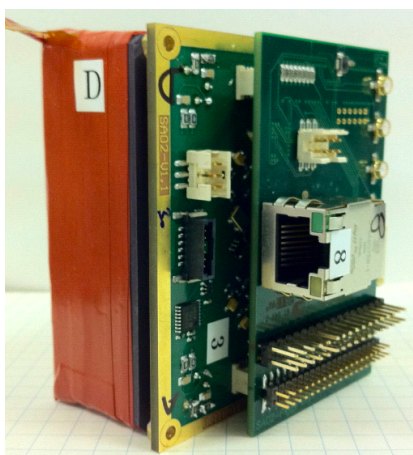


図 6.24: HAPD に読み出しボード，サブボードを接続した図

6.4 SA03 搭載読み出しボードの性能評価

6.4.1 性能評価セットアップ

SA03 を搭載した読み出しボードの性能評価を行った。セットアップは図 6.25 の様にした。HAPD には高電圧，読み出しボードからバイアスが供給されている。ノイズ測定等の光を使用しない測定ではファンクションジェネレータから 1 kHz のクロック信号を読み出しボードに入力し，波高分布測定等の光を用いた測定では同期したクロック信号を LED と読み出しボードに入力し測定を行った。LED からの光は光ファイバーを通して HAPD 前面に運ばれる。光ファイバーはステージコントローラに取り付けられているため移動することができ，HAPD の任意のチャンネルに光を照射できる。また DAQ やパラメータ設定を SiTCP 通信を用いて行った。

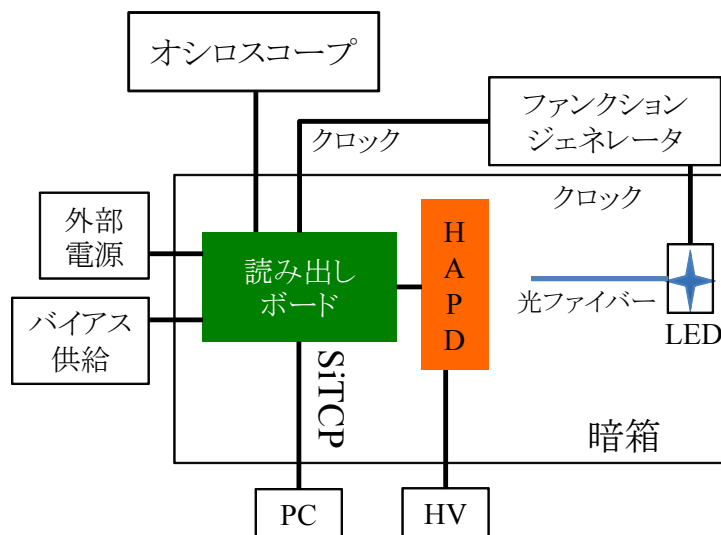


図 6.25: 性能評価セットアップ

オフセット調節

正しくオフセット調節できているか確認のため測定を行った。測定は放射線未照射の HAPD を用い 6.2.3 節で説明した Threshold scan を用いて行った。HAPD には Avalanche 増幅率 40 倍になる逆バイアスと 7 kV の高電圧を印加した。LED を発光させずに Threshold scan を行い，ノイズの波高分布を取得し，この波高分布をガウス関数で近似しピークを中心値 μ と標準偏差 σ を得る。 μ が 200 mV から 4σ 低い位置に来るようにオフセットを調節する。SA03 のパラメータは Shaping time, 増幅率ともに最少に設定した。

この様にしてオフセット調節をした結果が図 6.26 である。オフセット調節前後を比較するとオフセットが 200 mV を超えているチャンネルはなく楕円で囲まれ

た部分以外はオフセット調節できていると言える。また SA03 の粗調節は多少歪んでいるため、各オフセットの値を記録して設定できるようにするとより精度よくオフセット調節ができると思われる。

楕円で囲まれたノイズが大きいチャンネルは SA03 の 1 チップに相当しており、その内の 1 チャンネルのアナログ出力の結果が図 6.27 である。この様に周期的なノイズが 1 チップに混入しているためノイズが大きくなっている。これは SA02 を搭載していた時から発生しており読み出しボードが原因である。そのため次の読み出しボードの製作時に改善する予定である。

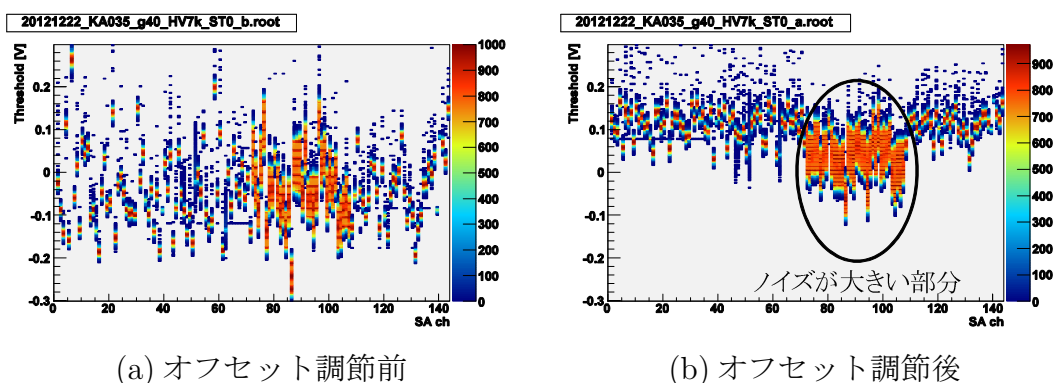


図 6.26: オフセット調節の前後比較結果

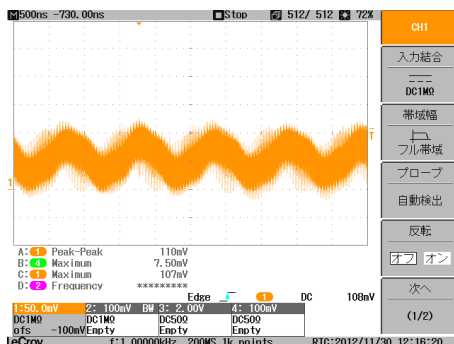


図 6.27: ノイズが大きいチャンネルのアナログ出力信号

ノイズ量測定

ノイズ量の測定はオフセット調節と同様の測定で行った。放射線未照射の HAPD を用い Threshold scan で得た σ からノイズを求めた。テストボードを用いた SA03 単体でのノイズ量は $4,200 e^-$ であった。しかしこの測定ではソケットを用いていたためノイズが大きくなっていると予想でき、読み出しボードにボンディングしてある本測定では $2,000 \sim 3,000 e^-$ 程度になると予想される。

結果は図 6.28 である。ノイズが大きいチップ以外では 3,000 e⁻ 程度となり、設計値 2,000 e⁻ と比較すると多少大きいがこの値でもヒット信号が 50,000e⁻ とすると

$$S/N = \frac{50,000}{3,000} \sim 17$$

となり十分に高い S/N であるため要求性能を満たしている。。

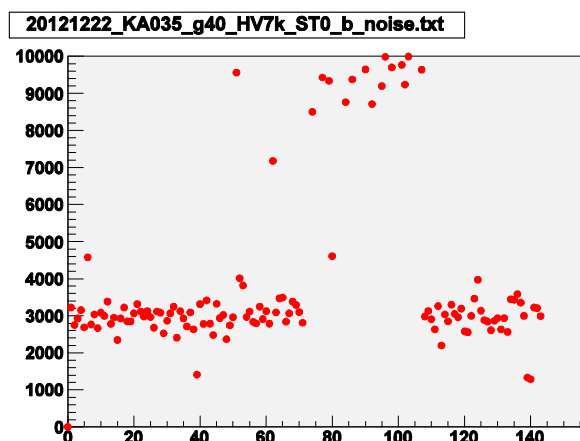


図 6.28: ノイズ量測定結果

光信号読み出し

光信号の読み出し確認のため 2次元スキャンを行った。2次元スキャンとは 200 mV を閾値電圧 V_{th} に設定しノイズの 4σ が 200 mV になる様オフセット調節をし、LED とクロック信号を同期させ 1,000 回トリガーを印加し、光ファイバーがある場所でのヒット率を測定する。その後、光ファイバーを 1 mm 動かすというプロセスを HAPD 全面に行う事により、HAPD 全面での光信号読み出し機能を確認する。本測定ではパルス当たり 0 ～数光子が入射する光量で行った。HAPD には Avalanche 増幅率 40 倍になる逆バイアス、7 kV の高電圧を印加し、SA03 のパラメータは Shaping time, 増幅率ともに最少に設定した。測定結果は図 6.29 である。HAPD 全体に渡り信号の読み出しができることを確認した。左下の検出効率が下がっているチップはボードからのノイズが大きいチップである。なお他のチップにある検出効率が低いチャンネルは SA03 の不良チャンネルもしくは HAPD のデッドチャンネルである。

6.4.2 放射線照射 HAPD を用いた測定

前章で決定した HAPD 量産機と同タイプである中性子とガンマ線が照射された KA058 を用いて測定を行った。HAPD には Avalanche 増幅率 40 倍のバイアス、高

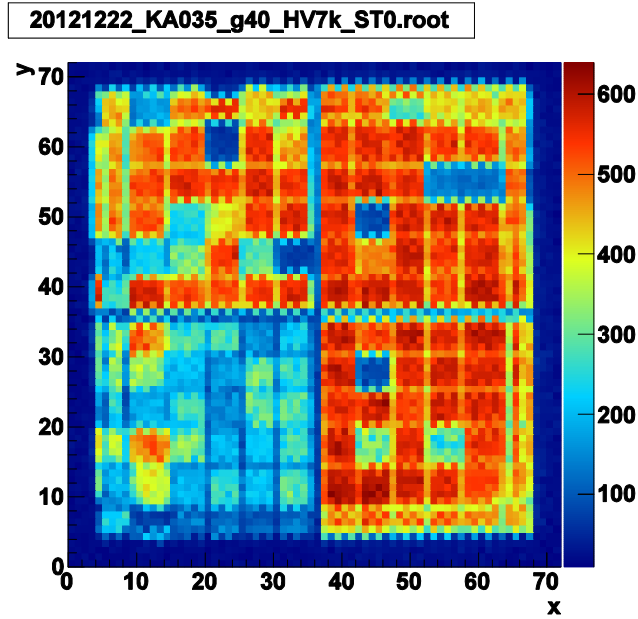
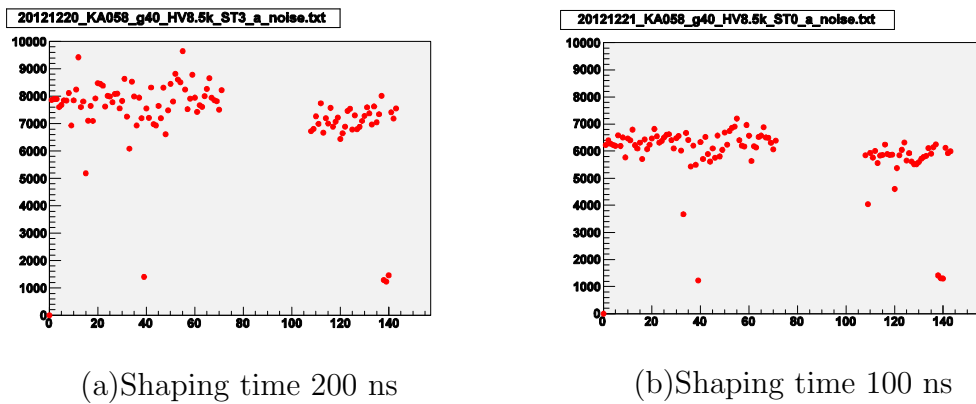


図 6.29: 2次元スキャン結果

電圧 8.5kV を印加した状態で行った。

Shaping time 短縮によるノイズ減少効果の確認

図 6.30 はノイズ測定の結果である。同図 (a) は SA03 の設定を Shaping time 200 ns(設計値) に, (b) は 100 ns にした結果である。Shaping time 200 ns の時の平均ノイズは 8,000 e^- 程, 100 ns の時の平均ノイズは 6,000 e^- 程であり Shaping time 短縮により読み出しボードを仕様にてのノイズ量減少を確認した。またノイズ量が 6,000 e^- とすると S/N は ~ 8 程度になると予想される。



(a) Shaping time 200 ns

(b) Shaping time 100 ns

図 6.30: 放射線照射 HAPD のノイズ量

1 光子の S/N 測定

LED 光の強度を複数の光子が入射する程度にし S/N 比測定を行った。チップ C を除く各チップのうち 1 チャンネルで LED 光を当て Threshold scan を行った。その結果を図 6.31 に示す。S/N 比の求め方は (5.4) 式を用いている。グラフの青い線はペデスタルをガウス関数で近似した結果、赤い線と緑の線はそれぞれ 1 光子、2 光子の波高値をガウスの誤差関数で近似した結果である。青い線の σ を (5.4) 式の σ_{ped} 、赤い線と緑の線の平均値の電圧を $M_{1p.e}$ 、 $M_{2p.e}$ とした。それらの結果をまとめたものが表 6.3 である。

この結果より全てのチップで S/N ~ 7 を達成する事を確認した。

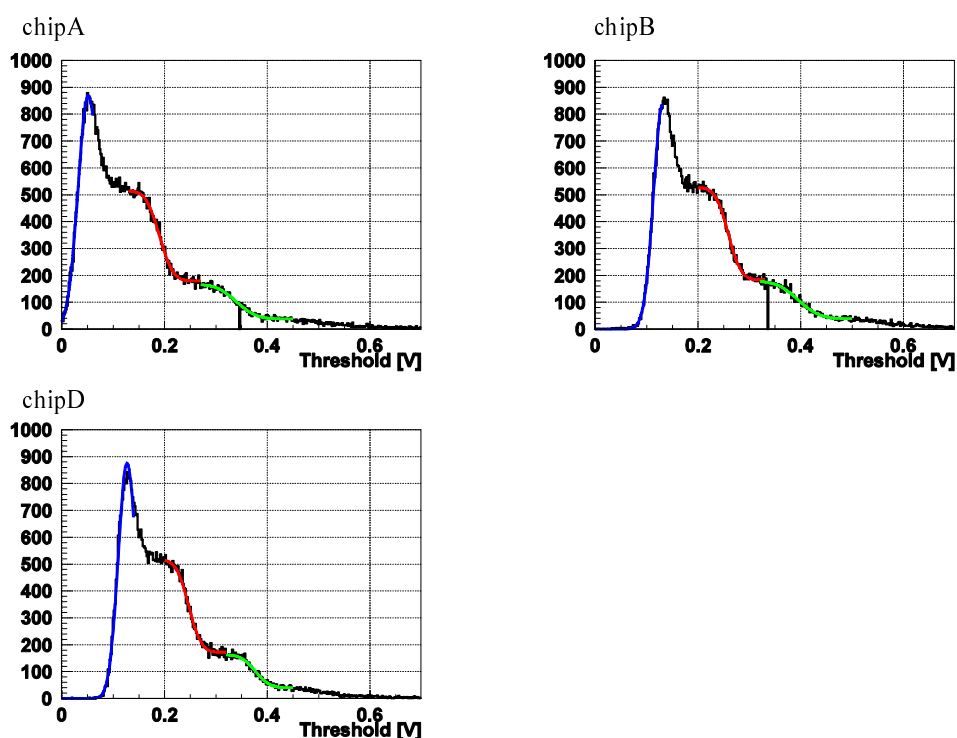


図 6.31: Threshold scan 結果

チップ	ノイズ	増幅率	S/N
A	7749	58380	7.5
B	7064	53015	7.5
D	6703	50500	7.5

表 6.3: Threshold scan 結果

6.5 A-RICH 読み出しボードの開発のまとめ

我々は A-RICH 読み出しシステムとして読み出しボードとボードに搭載する ASIC である「SA シリーズ」の開発を行っている。SA03 では中性子対策のため、読み出し時の Shaping time を短縮し 100 ns ~ 200 ns の範囲内で設定できることを確認し、基本的な要求性能を満たすことを確認した。

そこで TSMC 製 SA03 を搭載した読み出しボードを製作し基本的な性能評価を行った。読み出しボードの性能評価ではチップ C に周期的なノイズが混入しているためチップ C の部分ではノイズが非常に大きくなり使用が困難であったが、それ以外の部分では、オフセット調節や信号読み出し等の基本的な機能を満たすことを確認した。そのため次回読み出しボードを製作する時に改善をする予定である。

また Belle II 環境下相当の放射を照射した HAPD 量産機と同タイプの HAPD の Shaping time 短縮によるノイズ減少効果を確認し、実機用のセットアップで目標である S/N 7 程度以上での読み出しに成功した。

7 まとめ

Belle 実験は B 中間子系における CP 対称性の破れを検証する目的で行われた実験である。電子・陽電子衝突型加速器 KEKB で生成された大量の B 中間子の崩壊過程を Belle 検出器で観測することで主目的である B 中間子での CP 対称性の破れの存在を証明した。Belle 実験の結果には標準模型を超える新しい物理の兆候もみられたが、統計数が足りず確定的な証拠にはならなかった。そのため KEKB を SuperKEKB に Belle 検出器を Belle II 検出器にアップグレードすることで B 中間子系の崩壊の精密測定を行い新しい物理の観測を目的にしている実験が Belle II 実験である。

Belle 実験での Endcap 部粒子識別装置 ACC では Flavour tagging に特化させるため低運動領域である $0.5 \text{ GeV}/c < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ での粒子識別を行っていた。しかし新しい物理の観測のため Endcap 部では高い運動量の K 中間子や π 中間子の識別精度の向上が必要とされる。そこで Endcap 部の K/ π 粒子識別装置として A-RICH の開発を行っている。A-RICH は輻射体であるシリカエアロゲルを通過した荷電粒子から発生する Cherenkov 光を観測することで K/ π 識別を行う。荷電粒子から発生する Cherenkov 光は放射状に発生し、その放射角は通過粒子の質量に依存する。そのため A-RICH は Cherenkov 光をリングイメージとしてとらえ、リング半径から放射角を求めることで粒子識別を行う。A-RICH では $0.5 \text{ GeV}/c < p < 4.0 \text{ GeV}/c$ までの運動量において 4σ 以上の精度で K/ π 識別することを目標に開発が進められている。A-RICH は輻射体としてシリカエアロゲル、Cherenkov 光を検出する光検出器である HAPD、HAPD の信号読み出しシステムで構成されている。

HAPD に求められる性能として、単光子検出、1.5 T の磁場中での動作、5 mm 以下での位置分解能が求められ基本的な性能は満たしている。しかし Belle II 実験環境下での放射線耐性が課題として残っていた。Belle II 実験では電子・陽電子ビーム中での Touschek 散乱、Radiative Bhabha 散乱といった効果によりガンマ線や中性子等の放射線が発生する。これらの放射線により HAPD そのものが損傷を起し検出効率が低下する。そのためそれぞれの放射線による HAPD の影響を理解し対策を施した。

中性子による損傷は HAPD 内部の APD に損傷を与える。中性子により APD 内部の結晶構造が壊され格子欠陥が生じる。格子欠陥が生じると APD のバンドギャップ間に中間電位が生じリーク電流が増加することで、ショットノイズが増大し S/N 比の低下が起こる。そのため中性子対策として APD の P⁺ 層を薄くする、P 層を薄くする、読み出し時 Shaping time の短縮を行った。P⁺ 層は受光面上部に位置し光電子の進行を妨げ打ち込み増幅が低下してしまう。そのため P⁺ 層を薄くすることで打ち込み増幅の向上が考えられる。P 層は中性子損傷によるリーク電流の増

加に寄与しやすいため、格子欠陥の総数を減らすため薄くした。リーク電流により増加するショットノイズは Shaping time に比例して増大するため読み出しシステムに搭載する ASIC を短縮することで読み出し時のノイズを低減する。

ガンマ線は HAPD 用 APD 表面にある保護膜が帯電し、その下部にある P 層の上部に負電荷が引き寄せられることで N 層化し、耐圧の低下や周辺部ブレイクダウンが発生する。ガンマ線の対策としてアルカリ保護膜の除去、中間電極の実装があげられる。保護膜のうち、アルカリ保護膜が最も耐性が低いことが確認されたため、HAPD 製法の改善によりアルカリ保護膜を使用しない製法が開発された。中間電極は APD のバイアス電極とグラウンド間に新たに電極を実装することでその間の電位が安定し耐圧の低下が緩和される。

量産機用 HAPD の構成を決めるため、これらの対策が施された HAPD を用いて中性子照射試験、ガンマ線照射試験が行われた。中性子照射試験では、P 層、P⁺層を薄くした効果を確認し、受光面膜が A のタイプは Belle II 実験 10 年間の使用が可能であると見積もられた。しかし受光面膜 C のタイプではリーク電流が許容以上に増加したため現状では使用はできない。ガンマ線照射試験では受光面膜が A のタイプで周辺部ブレイクダウンが発生したが、アニーリングによって動作電圧以上まで回復した。受光面膜 C のタイプでは周辺部ブレイクダウンは発生しなかった。また中間電極は照射中の緩やかな電流上昇を抑制する効果と、チップ単位では周辺部ブレイクダウンは発生したが周辺部ブレイクダウン発生チャンネル数は中間電極のない HAPD と比較して少ないことが確認された。以上の結果より、HAPD 量産機として受光面膜 A、P 層薄、P⁺層、中間電極有のタイプが採用された。

周辺部読み出しシステムとして HAPD のノイズ低減のため実機搭載用に Shaping time を短縮した ASIC 「SA03」を製作した。SA03 は TSMC 製、X-FAB 製 2 種類を用意し Belle II 実験用の SA03 を選択するため性能評価を行った。SA03 の Shaping time は 100 ～ 200 ns に設定できるように設計され、実測値では TSMC 製は 170 ～ 400 ns、X-FAB 製は 170 ～ 350 ns と大きくなったが基本的性能を満足することを確認した。X-FAB 製 SA03 は TSMC 製と比較して製造費用が少なく不良チャンネル率も低いため X-FAB 製 SA03 を Belle II 実験時に使用する。SA03 が基本的性能を満たしていることを確認したので読み出しボードに実装し Belle II 環境下で推定される放射線を照射した HAPD で性能評価を行った。読み出しボードの 1 チップにノイズが混入するため、そのチップ以外では Shaping time 短縮により設計値 200 ns 時のノイズ～8,000 e⁻ から 100 ns で 6,000 e⁻ 程に減少することを確認した。S/N 測定では目標値である S/N 比 7 程度以上での信号読み出しができることを確認した。次回読み出しボード製作時に改善し混入するノイズを除去すれば実機用のセットアップで Belle II 実験で使用可能であることを確認した。

謝辞

本研究はたくさんの方の御指導，ご協力のおかげで行うことができました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

住吉孝行教授には Belle II 検出器のアップグレードに参加する貴重な機会を与えていただき感謝致します。また，未熟である私に忙しい中にも関わらず理論的，実験的なご指導をして頂きました。角野秀一准教授には放射線照射試験での測定手法のご指導のみではなく測定自体もしていただき大変感謝しております。汲田哲郎助教には特にエレクトロニクスの基礎から詳しく教えて頂きその後の研究生活での助けとなりました。ありがとうございます。

Belle II A-RICH グループの共同研究者の皆様には最先端の研究の場を提供して頂いたこと，実際の測定や解析手法のご指導を頂き感謝致します。高エネルギー加速器研究機構の足立一郎准教授，西田昌平助教，原康二助教には多くのご指導，ご支援を頂きました。足立一郎准教授には A-RICH 全体の事やミーティングでのご指導を頂きました。西田昌平助教には未熟な私に ASIC の機能説明や FPGA の開発方法といった基礎的な事から丁寧にご指導頂きました。原康二助教にはガンマ線照射試験で測定や解析方法の基礎のご指導や研究に対する姿勢を学びました。感謝致します。岩田修一氏には御自身の時間を割いて基礎の基礎からご指導して頂いたことや A-RICH グループの学生をまとめて頂いた事，感謝致します。また昨年卒業された高垣英幸氏，東邦大学の森和香奈氏には HAPD の取り扱い方や測定方法等のご指導をしていただきありがとうございます。同期である東京理科大学の樋口雅弘氏とは共に研究しながら研究に対する姿勢などを学び成長することが出来ました。山見仁美氏，東邦大学の浜田尚氏には実際の測定等を行って頂き感謝しております。

高エネルギー実験研究室の千葉雅美助教，前田順平特別研究員，松原綱之特別研究員には違った研究の立場から様々な助言を頂き感謝致します。研究室の同期である松本浩平氏，谷川孝浩氏とは忙しい時期等は共に励ましあい研究に励むことが出来ました。そして同研究室の学生には研究生生活以外でもご支援をいただきありがとうございます。また物理コースの同期の皆様には様々な場面で激励や助言等を頂きありがとうございます。

最後に無理なお願いを聞いて本研究を支援して頂いた両親と姉，および親族に感謝を述べさせていただきます。謝辞と致します。

参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration “*Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC*”, Phys. Lett. B **716** , 1 - 29 (2012)
- [2] T. D. Lee and C. N. Yang, “*Question of Parity Conservation in Weak Interactions*”, Phys. Rev. **104**, 254 - 258 (1956)
- [3] C. S. WU, “*Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*”, Phys.Rev. **105**, 1413 - 1415 (1957)
- [4] L. D. Landau, “*On the conservation laws for weak interactions*”, Nucl.Phys. **3**, 127 - 131 (1957)
- [5] J.H.Christenson, J.W.Cronin, V.L.Fitch and R.Turlay “*Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson*”, Phys.Rev. Lett **13**, 138 - 140 (1964)
- [6] A. G. Akkeroyd *et al* “*Physics at Super B Factory*”, arXiv:1002.5012v1 [hep-ex].
- [7] J.-T. Wei *et al* “*Measurement of the Differential Branching Fraction and Forward-Backward Asymmetry for $B \rightarrow K^{(*)}l^+l^-$* ”, Phys.Rev. Lett **103**, 171801 (2009)
- [8] CKM fitter, <http://ckmfitter.in2p3.fr/>
- [9] M. Kobayashi and T. Maskawa “*CP-Violation in the Renormalization Theory of Weak Interaction*”, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 - 657 (1973)
- [10] L. Wolfenstein “*Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix*”, Phys. Rev. Lett **51**, 1945 - 1947 (1983)
- [11] T. Abe *et al.* “*Belle II Technical Design Report*”, arXiv:1011.0352v1 [physics.ins-det]
- [12] 生出秀行, 音野瑛俊, 山下了 “*次世代光検出器 Pielated Photon Detector*”, 日本物理学会誌 **66 - 1**, 20 (2011)
- [13] H. Hamasaki *et al* “*Kaon Identification in Belle*”, Belle note **321** (2000)

- [14] T. Iijima *et al* “A novel type of proximity focusing RICH counter with multiple refractive index aerogel radiator”, Nucl. Inst. Meth. **A548**, 383 - 390 (2005)
- [15] I. Adachi *et al* “Study of transparent silica aerogel with high refractive index”, doi:10.1016/j.nima.2010.08.125
- [16] C. Feldman “Range of 1-10 keV Electrons in Solid”, Phys. Rev. **117**, 455 - 459 (1960).
- [17] J-PARC HP, <http://j-parc.jp/>
- [18] TSMC HP, <http://www.tsmc.com/japanese/default.htm>
- [19] X-FAB HP, <http://www.xfab.com/index.php?id=107>
- [20] 椎塚晋 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文 (2010)
- [21] 今村美貴 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文 (2011)
- [22] 岩田修一 首都大学東京大学院 理工学研究科 修士論文 (2011)
- [23] 高垣英幸 首都大学東京大学院 理工学研究科 修士論文 (2012)
- [24] 森和香奈 東邦大学大学院 理学研究科 修士論文 (2012)