

2011年度 修士学位論文
Belle II実験 Aerogel-RICHにおける
読み出しシステムの開発

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻
高エネルギー実験研究室 博士前期課程

高垣英幸

平成24年1月10日

概要

Belle II 実験とは B 中間子の稀崩壊を精密に観測することによって、新しい物理の効果を観測することを目的とした実験である。

Belle II 検出器の Endcap 部の粒子識別装置 Aerogel Ring Imaging Cherenkov Counter(A-RICH) は 4 GeV までの運動量を持つ K 中間子と π 中間子を 4σ の精度で識別を行うことを目指している。A-RICH は Cherenkov 光を輻射体であるシリカエアロゲルで発生させ、光検出器である Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) を用いて Cherenkov 光のリングイメージを捉えることで粒子識別を行う装置である。

我々は A-RICH の読み出しシステムに用いるためのフロントエンド部における読み出し用 ASIC 「SA シリーズ」を開発している。これまで、SA シリーズは 2nd version である SA02 において基本的な要求性能を満たすことを確認してきた。

しかし、HAPD が実験中に中性子損傷を受け、リーク電流の増加に伴いノイズ増加が予想されるため、読み出し用 ASIC の Shaping time を最適値に設定することで読み出し時のノイズ量を最小限に抑える必要があると考え、Shaping time を最適化した SA03 を開発した。

また、SA02 では ASIC の増幅率など各種パラメータの読み込みを破壊読み出し方式で行なっていた。この方式ではパラメータを読み出す際に、再度同一のパラメータをレジスタに書き込むまでの時間がデッドタイムになってしまう。そのため、SA03 ではパラメータ設定方式を非破壊読み出し方式に変更した。

これらの機能の確認のため、シミュレーションにより動作検証を行った後、SA03 を試作し、その性能評価を行った。その結果、Shaping time の最適値への設定、および非破壊読み出し機能を確認し、要求性能を満たしていることを確認した。そして、SA03 のプロトタイプである SA02 に Belle II 実験 10 年間行った際に飛来すると予想される放射線を照射し、前後でノイズ量を比較し、Belle II 実験 10 年分の放射線耐性を確認した。また、SA03 を大量生産した際にこれらを迅速にテストするための性能評価用ボードを開発した。そして、SA02 を搭載した読み出し用ボードの性能評価を行い、必要な機能を確認した。

このように本研究により A-RICH のフロントエンド部の読み出しシステムの開発を進展させた。

目次

| | |
|---|----|
| 概要 | 2 |
| 第 1 章 序章 | 6 |
| 1.1 序 | 6 |
| 1.2 CKM 行列と Unirarity Triangle | 7 |
| 1.3 B-Factory 実験 | 8 |
| 1.4 Belle II 実験での新しい物理の観測 | 11 |
| 1.4.1 前後方非対称性度の精密測定 | 12 |
| 1.4.2 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の測定 | 13 |
| 1.4.3 新しい物理の観測のまとめ | 14 |
| 第 2 章 Super KEKB 加速器と Belle II 検出器 | 15 |
| 2.1 SuperKEKB 加速器へのアップグレード | 15 |
| 2.2 Belle II 検出器 | 16 |
| 2.2.1 PXD,SVD | 18 |
| 2.2.2 CDC | 18 |
| 2.2.3 TOP | 20 |
| 2.2.4 Aerogel RICH | 20 |
| 2.2.5 ECL | 21 |
| 2.2.6 KLM | 21 |
| 第 3 章 Endcap PID 装置のアップグレード | 22 |
| 3.1 Cherenkov 放射の原理 | 22 |
| 3.2 Belle 実験における K/π 識別 | 24 |
| 3.3 A-RICH の原理 | 25 |
| 3.4 A-RICH の開発 | 27 |
| 3.5 シリカエアロゲル | 28 |
| 3.6 HAPD | 29 |
| 3.6.1 HAPD の中性子対策 | 31 |
| 3.7 読み出しシステム | 33 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 第 4 章 | 読み出し用 ASIC シミュレーションによる 動作検証 | 36 |
| 4.1 | SA シリーズ | 36 |
| 4.2 | SA02 の概要 | 38 |
| 4.3 | SA03 への要求性能と改良点 | 40 |
| 4.4 | SA03 アナログ部動作検証 | 42 |
| 4.5 | SA03 デジタル部動作検証 | 49 |
| 4.6 | SA03 シミュレーションのまとめ | 54 |
| 第 5 章 | A-RICH のための 読み出し用 ASIC の実機評価 | 55 |
| 5.1 | SA シリーズのパッケージ | 55 |
| 5.2 | 性能評価のセットアップ | 56 |
| 5.3 | 性能評価項目 | 58 |
| 5.4 | 性能評価方法 | 58 |
| 5.5 | SA02 の性能評価 | 59 |
| 5.6 | SA03 の性能評価 | 64 |
| 5.7 | パラメータ非破壊読み出しの検査 | 64 |
| 5.8 | SA02, SA03 の性能評価のまとめ | 70 |
| 第 6 章 | 読み出し用 ASIC の放射線耐性の評価 | 71 |
| 6.1 | 中性子照射試験 | 71 |
| 6.2 | ガンマ線照射試験 | 73 |
| 6.3 | 放射線耐性のまとめ | 74 |
| 第 7 章 | HAPD 読み出し用ボードの 性能評価 | 75 |
| 7.1 | 読み出し用ボードの開発 | 75 |
| 7.2 | 読み出し用ボードの性能評価 | 77 |
| 7.3 | 読み出し用ボード性能評価のまとめ | 82 |
| 第 8 章 | 読み出し用 ASIC SA03 性能評価用ボードの開発 | 83 |
| 8.1 | 性能評価用ボードの概要 | 83 |
| 8.2 | 性能評価用ボードの設計 | 84 |
| 8.3 | 性能評価用ボードのまとめ | 85 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 9 章 A-RICH における読み出しシステム開発の今後の予定 | 87 |
| 9.1 SA03 の開発予定 | 87 |
| 9.2 Merger Board の開発 | 87 |
| 第 10 章 まとめと今後 | 89 |
| 参考文献 | 92 |

第1章 序章

1.1 序

これまで、素粒子物理学において標準模型 (Standard Model) は様々な実験的検証によってその正しさが 100 GeV 以下のエネルギー領域において確立されてきた。Belle 実験はその標準模型の基幹を成す小林・益川理論が予言する、 B 中間子での CP 対称性の破れの観測を目的とした実験である。Belle 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構で 1999 年 6 月から 2010 年 6 月まで 11 年間に渡り行われた B-factory 実験である。

Belle 実験はその目的である B 中間子系での CP 対称性の破れの観測すると共に、新しいハドロンの共鳴状態の発見など数々の成果を挙げた。

これまでの素粒子実験の結果では標準模型はあらゆる実験的結果を説明することに成功している。しかし、標準模型にはいくつかの不十分な側面もある。階層性の問題、電弱相互作用と強い相互作用が統一されていないこと、重力が含まれていないこと、暗黒物質や暗黒エネルギーを説明できないこと、などが挙げられる。

これらを解決するために標準模型を超える新しい物理として現在、超対称性理論 (SUSY) や余剰次元理論 (Extra dimensions) などが候補として提案されている。いずれにおいても TeV スケールでのエネルギー領域に新しい物理法則があると考えられている。この TeV 領域にある物理法則を観測し、解明することが現代の素粒子物理学における最重要課題であると言える。

そのためには TeV 領域でのエネルギーフロンティア実験によって新粒子を生成し観測すること、高ルミノシティフロンティア実験において新しい物理のフレーバー構造を明らかにすることが必要である。

現在、高エネルギーフロンティア実験に関してはスイスの CERN (欧州合同原子核研究機構) において LHC (Large Hadron Collider) が稼働している。高ルミノシティフロンティア実験として、Belle 実験のために開発された KEKB 加速器と Belle 検出器をアップグレードさせ、更に精密に B 中間子系の稀有な崩壊を観測することを目指す Belle II 実験計画が進められている。[1]

本章では、標準模型における B 中間子の物理や B-factory 実験の成果と、Belle II 実験において観測が期待される標準模型を超える新しい物理の可能性とそれを暗示させるいくつかのモードについて述べ、 K/π 識別の重要性について解説する。

1.2 CKM 行列と Unirarity Triangle

1964年に J. W. Cronin, V. L. Fitch らによって中性 K 中間子系における CP 対称性の破れが世界で初めて観測された。彼らの実験では、中性 K 中間子の CP 固有状態の一つ K_L が CP 対称性のため通常は崩壊しないと思われていた 2π (CP even) への崩壊をわずかに含んでいることを示した。[2]

この CP 対称性の破れを理論的に説明したのが小林誠, 益川敏英である。小林・益川理論は電荷+2/3と電荷-1/3のクォークが3世代以上存在することを示しており、弱い相互作用を通じて世代を超える遷移を起こすとしている。[3] この世代間混合は以下の様に表される。

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

それぞれ 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。右辺の3行3列の行列を Cabbibo-Kobayashi-Maskawa(CKM) 行列と呼び、各要素 V_{ij} の大きさがその添字に記されたクォーク間の混合強度に比例する。

この小林・益川理論によってクォークの CP 固有状態と質量固有状態の変換行列の中に複素位相が1つ以上含まれていれば、 CP 対称性が破れることを示された。このCKM行列を (A, λ, ρ, η) の4つのパラメータを用いる Wolfenstein 表示 [4] を用いると以下のように表される。

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ただし、ここでは $\mathcal{O}(\lambda^4)$ 以上の項は無視している。この表示における複素位相は、 η に置き換えられる。この表示より対角成分が最も大きな値を取ることがわかる。ここで、CKM行列はユニタリー行列であるので

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.2)$$

を満たす。

左辺の V^*V は、Wolfenstein パラメータ (ρ, η) による複素平面上のベクトルとして表現することができ、3個のベクトル和を表す式と同値である。

したがって、 $\rho\eta$ 平面上に三角形を描くと図 1.1 のようになる。この三角形の各辺、角度の大きさを精密に測定することが CP 対称性の破れの大きさの検証となる。また、精度の高い測定を行うことによって Unitary Triangle が崩れれば、標準模型を超える新しい物理の可能性を示唆する結果となる。

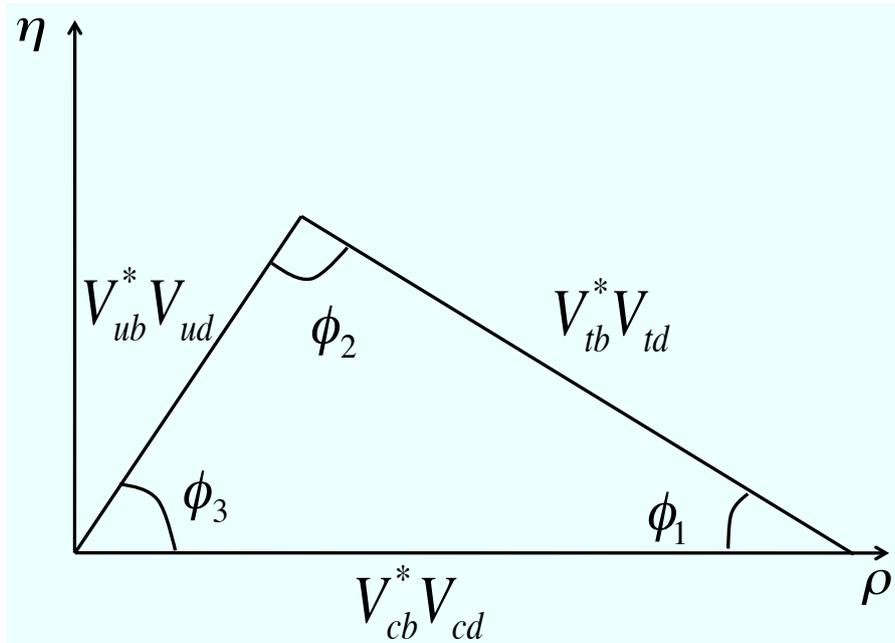


図 1.1: Unitary Triangle 各辺がCKM 行列の要素の大きさに対応し，角度は要素の比に比例する

1.3 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 非対称性の破れが K 中間子より大きいことが期待されていた。K 中間子において，CP 固有状態の K_S と K_L の寿命の比は約 500 倍あり，かつ寿命は $K_L \sim 10^{-8}$ s 程度である。一方で B 中間子の寿命は $\sim 10^{-12}$ s と短く，K 中間子と比較して寿命差が短いため， B^0 と \bar{B}^0 の寿命差を測定することが技術的に困難であった。

B 中間子の寿命が短いことによる困難を解決するための手法として，電子と陽電子のエネルギーを非対称にして衝突させることで，生成された B 中間子対を Lorentz boost させ，崩壊時間を伸ばす方法が採用された。

かつ，B 中間子の精密な寿命測定のためには統計数が大きくなくてはならない。そのため，Luminosity の高い加速器を用いて B 中間子を大量に作ることで統計数を増やし，B 中間子系の寿命の統計誤差を小さくすることが重要である。

このようにして，電子・陽電子を非対称のエネルギーで衝突させ，かつ高い Luminosity で大量に B 中間子対を作り出し，B 中間子系の CP 対称性の破れを観測することを目的とした実験を B-Factory 実験と呼ぶ。2012 年までに実施された B-factory 実験は Stanford Linear Accelerator Center (SLAC 図 1.2) の PEP-II 加速器による BaBar 実験と KEK (図 1.3) の KEKB 加速器で行われた Belle 実験である。両実験はその主

たる目的であった B 中間子系における CP 対称性の破れの観測に成功し、小林・益川模型を 2002 年に実験的に証明した。[6]

その成果として 2008 年に小林・益川両氏はノーベル物理学賞を受賞した。

なお、BaBar 実験は 2008 年 4 月に、Belle 実験は 2010 年 6 月に運転を終了した。



図 1.2: BaBar 実験が行われた SLAC



図 1.3: Belle 実験が行われた KEK

なお、B 中間子系における CP 対称性の破れを観測するメインとなるモードは $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ である。

Belle 実験、BaBar 実験では e^+ と e^- を対消滅させ $\Upsilon(4S)$ を生成し、 $B^0 \bar{B}^0$ 対に崩壊することにより生成する。KEKB 加速器では High Energy Ring (HER), Low Energy Ring (LER) でそれぞれ電子と陽電子を 8.0 GeV/c, 3.5 GeV/c まで加速させ、衝突時の重心エネルギーが $\Upsilon(4S)$ の質量である 10.58 GeV になるように設計された。

この $\Upsilon(4S)$ は B^0 と \bar{B}^0 に崩壊し、それらは図 1.4 の box diagram のように $B^0 \bar{B}^0$ を通じて互いに入れ替わる。

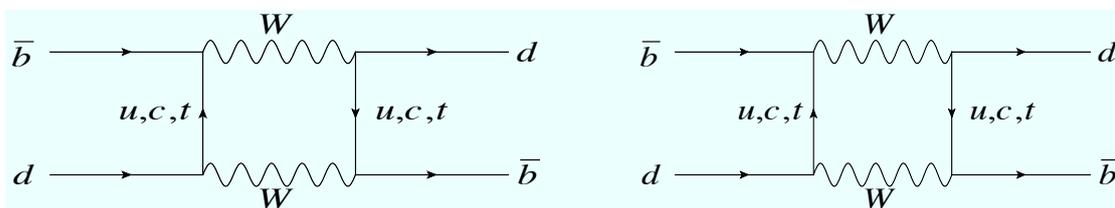


図 1.4: $B^0 - \bar{B}^0$ 系における混合を表す Feynman diagram の例

B^0 も \bar{B}^0 も最終的に同じ CP 固有状態 f_{CP} に崩壊することが許される。終状態 f_{CP} を観測するだけでは B^0 、あるいは \bar{B}^0 のどちらが親粒子であったのか決定すること

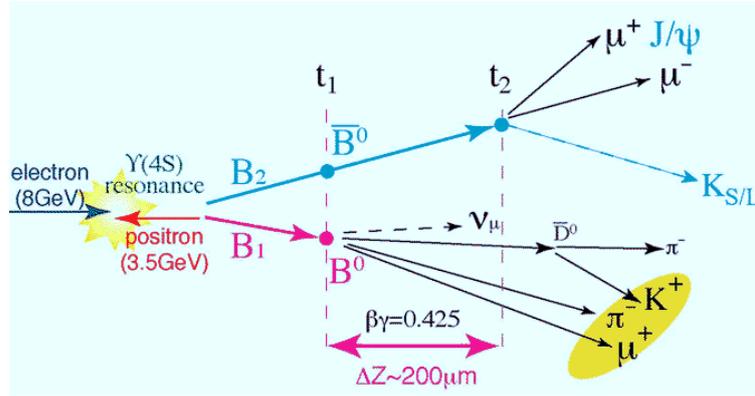


図 1.5: 非対称エネルギーでの $B^0 - \bar{B}^0$ 生成とその後の崩壊の概念図。

ができない。そこで、注目している CP 固有状態 $f_{CP} = J/\psi K_0$ に崩壊するのではなく、その反対側の崩壊モードを観測することで親粒子を同定する。そこで、 \bar{B}^0 のレプトニック崩壊を考える。 $\bar{B}^0 \rightarrow l^- + \bar{\nu} + anything$ が伴う崩壊を測定する。ある時間 t で l^- が観測された場合、その対は t のとき、 B^0 であると同定できる。このようにして B 中間子の Flavor tagging を行うことができる。図 1.5 のモードでは B^0 を tag side としている。tag side の B^0 から崩壊した荷電粒子 $\bar{D}^0 (\rightarrow K^+ \pi^-)$ は CP 固有状態ではないため、それ以外の量子数から B^0 と同定することができる。したがって CP side の親粒子は確実に \bar{B}^0 と同定できる。このようにして CP 固有状態を明らかにすることになる。

CP 非対称を観測するということは、崩壊寿命の差を観測するということになる。 B^0 が $J/\psi K^0$ (K^0 は実験的には K_S または K_L 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 1.6 である。小林・益川理論から B 中間子における時間依存の CP 非対称度 $a_f(t)$ は以下の式で定義される。

$$a_f(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} \quad (1.3)$$

$$a_{J/\psi K^0}(t) = \sin 2\phi_1 \sin(\Delta M \Delta t) \quad (1.4)$$

ここで、 ΔM は B 中間子の CP 固有状態 B_1, B_2 の質量差である。よって、この ΔM を求めることによって、測定した $a_f(t)$ を用いて $\sin 2\phi_1$ の測定が可能である。

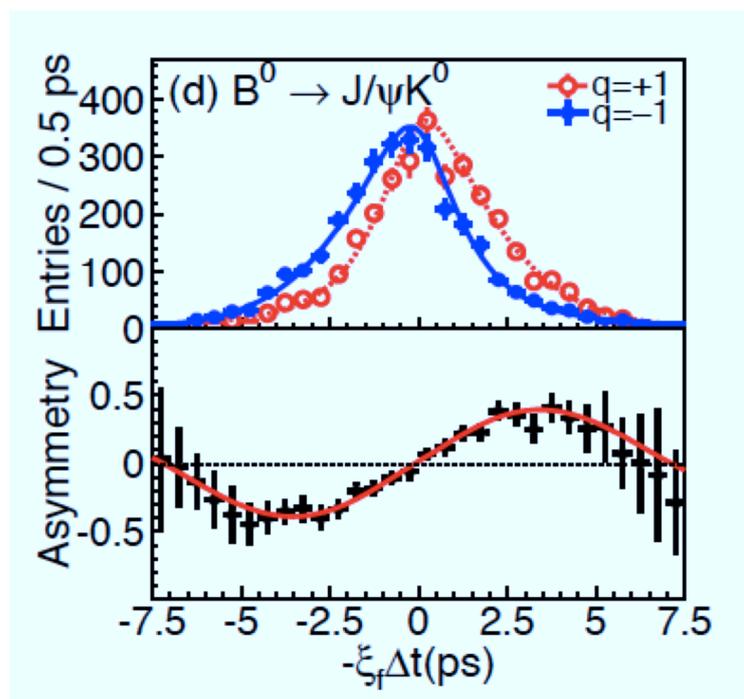


図 1.6: $B_0 \rightarrow J/\psi K_S$ の崩壊時間 Δt の分布 (上)。 $\sin 2\phi_1$ が求められることがわかる (下)[8]

1.4 Belle II 実験での新しい物理の観測

これまでの実験的結果を小林・益川理論を含む標準模型は見事に説明する。しかし、標準模型には階層性の問題など未解決問題があるため、究極の素粒子理論となる可能性は低い。その問題を解決するための理論の候補として TeV オーダーに新しい物理があると期待されている。LHC はこれらの新しい物理における新粒子やヒッグス粒子を直接観測するため、TeV オーダーのエネルギーでの陽子と陽子の衝突実験を行っている。

一方で、新しい物理が高次効果で寄与する崩壊を観測するため、Belle II 実験のように高ルミノシティでクリーンなイベントを観測することも重要である。もし新しい物理が存在していた場合、高エネルギーフロンティアの実験によって観測された TeV オーダーにおける新しい物理を高ルミノシティフロンティア実験が相補的に観測し、証明することができるためである。以下では Belle II での観測が期待される新しい物理の証拠となる崩壊の例を上げる。

1.4.1 前後方非対称性度の精密測定

図 1.7 のようなペンギンダイアグラムで発生した γ がレプトン対に結合して起こる電弱崩壊 $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ の際に放出される K^* 中間子の方向に対する正電荷レプトンの前後方非対称性度を精密に測定することによって、新しい物理に対してより多くの情報を得られると考えられる。図 1.7 のダイアグラムに新しい物理が寄与した場合、この非対称性が標準模型からずれるためである。

図 1.8 が前後方非対称性度の Belle 実験の結果である。Belle II で更にこの崩壊を精度良く観測することで新しい物理を暗示させる結果を得られる可能性がある。これらの崩壊の観測には K と π の識別が重要となる。

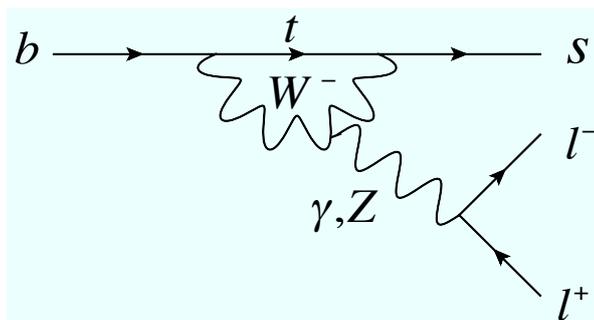


図 1.7: $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ の崩壊ファインマンダイアグラム

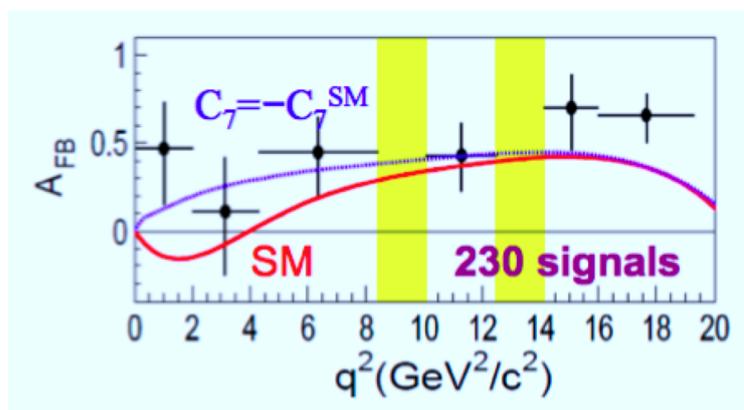


図 1.8: Belle 実験での前後方非対称性度の結果，赤線は標準模型における予想値 [9]

1.4.2 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の測定

$B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ は最終的に $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ へと崩壊する。この崩壊は図 1.9 のダイアグラムのようにトップクォークがループを介する。トップクォークのように標準模型における重い粒子がループを介する崩壊は新しい物理の効果が現れやすい。この崩壊モードにおけるバックグラウンドモードとしては $K^* \rightarrow K^+ \pi^-$ などが考えられる。図 1.10 に Belle 実験で用いた Barrel 部と Endcap 部の粒子識別装置を用いた場合の ΔE の分布の測定結果のシミュレーションによる比較を示す。[1] シミュレーションによると、Belle 検出器における Barrel 部と Endcap 部でアップグレードを行うことで $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の感度が約 80% 向上すると予想されている。このように新しい物理の効果がループを介して寄与するモードを観測するためには精度良く K/π 識別を行うことが重要である。

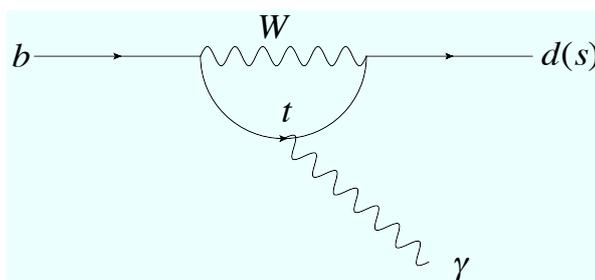


図 1.9: $B \rightarrow \rho \gamma$ の崩壊ファインマンダイアグラム

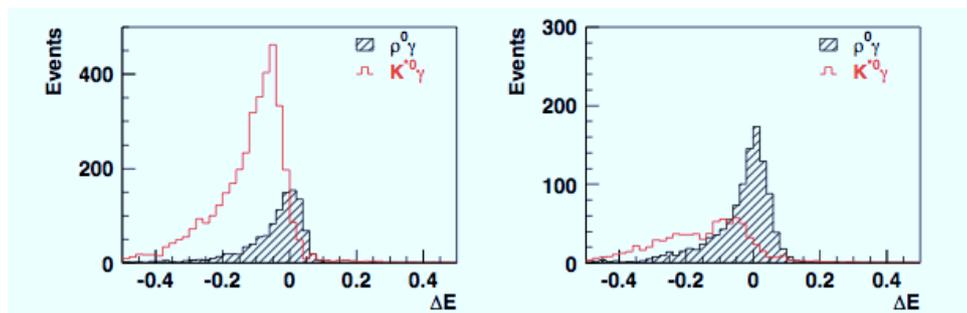


図 1.10: 7.5 ab^{-1} のデータを取得した際に期待される $B \rightarrow \rho \gamma$ の ΔE の分布。(a) Belle における粒子識別装置で $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の予想される観測結果 (b) Belle II における粒子識別装置で $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の予想される観測結果 [1]

1.4.3 新しい物理の観測のまとめ

本節では Belle II 実験において新しい物理の効果の寄与が観測すると期待される崩壊モードの例を挙げた。

Belle 検出器の粒子識別装置は B 中間子系における CP 対称性の破れの観測に大きな役割を果たしたが, Belle II 実験の目的である B 中間子系の崩壊における新しい物理の効果の観測のためには十分な精度を持っていないため, Belle II 実験では粒子識別装置の性能を向上させることで, 新しい物理の効果が期待される崩壊モードの観測を目指す。

このように K/π 識別の精度向上は新しい物理の効果の観測のために重要である。

第2章 Super KEKB 加速器と Belle II 検出器

本章では Belle II 実験に向けて開発が進められている Super KEKB 加速器と Belle II 検出器についての目的と原理を述べる。

2.1 SuperKEKB 加速器へのアップグレード

Belle 実験の際に使用した KEKB 加速器は電子を 8.0 GeV/c の運動量まで加速させるための HER(High Energy Ring), および陽電子を 3.5 GeV/c の運動量まで加速させるための LER(Low Energy Ring) の 2 つで構成されており, 電子と陽電子を非対称のエネルギーで衝突させる加速器であった。重心系のエネルギーを $\Upsilon(4S)$ の質量である 10.58 GeV にし, その崩壊により B 中間子対を作り出す。

ここで, 電子・陽電子のエネルギーを非対称にしている理由は $\Upsilon(4S)$ を Lorentz boost させ, B 中間子の生成点から崩壊点までの飛行距離を延ばすためである。飛行距離を伸ばすことで B 中間子の寿命の測定ができる。

前章に記述したように, B factory 実験では B^0 と \bar{B}^0 の CP 固有状態に崩壊する時間分布の差を観測することで, B 中間子の CP 対称性の破れを測定する。そのため, B 中間子を大量に生成し, 統計量を高くすることが B factory 実験において重要である。したがって高いルミノシティを実現することが必須である。Belle 実験で使用した KEKB 加速器ではピークルミノシティを $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで達成することができた。これは B 中間子対が一秒間に 20 個程度生成されることに相当する。また, KEKB 加速器は 2007 年にビームのバンチを衝突する直前に傾ける技術であるクラブ衝突を世界で初めて実現した。これは KEKB 加速器において高い Luminosity の実現に大きく貢献した技術である。¹

Belle II 実験では電子を 7.0 GeV/c, 陽電子を 4.0 GeV/c に図 2.1 の SuperKEKB 加速器を用いて加速させ, 衝突させる。また, ビームの交差角は 83 mrad になる。Super KEKB 加速器で電流を 2 倍にすることでビーム中の電子, 陽電子を増やし, ビームサイズを 1/20 倍にすることでルミノシティを KEKB 加速器の 40 倍に増強することを目指している。

¹Super KEKB 加速器ではクラブ衝突は採用しない

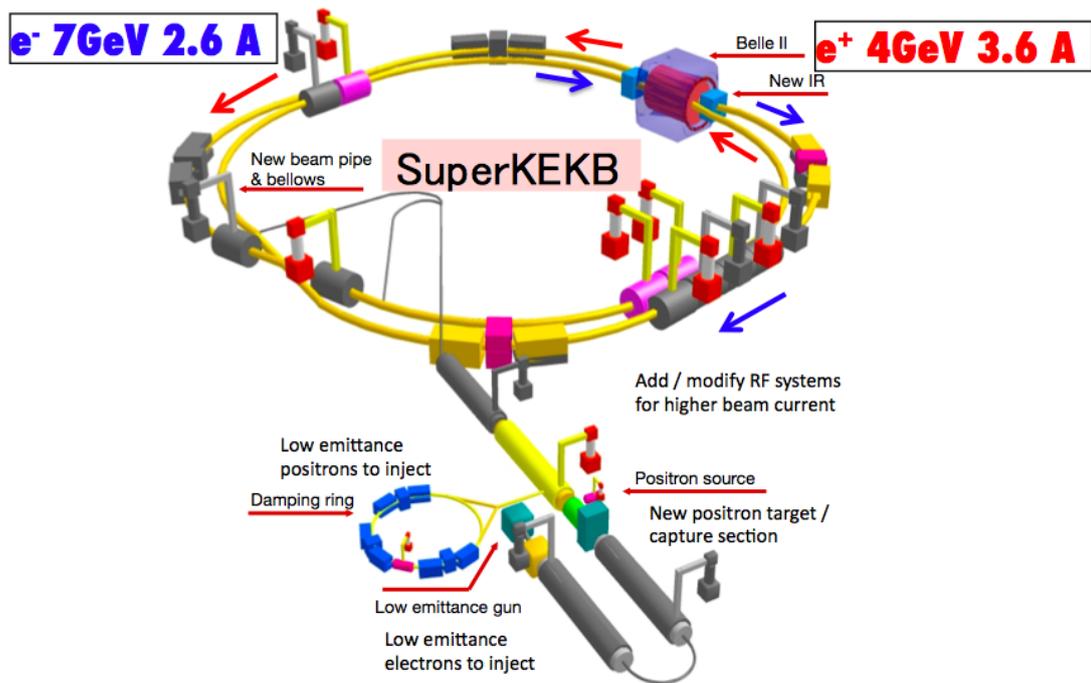


図 2.1: SuperKEKB 加速器の完成イメージ

2.2 Belle II 検出器

現在、Belle II 検出器へのアップグレードが進められている。Belle II 検出器は図 2.2 のように PXD, SVD, CDC, TOP, Aerogel RICH, ECL, KLM の検出器で構成されている。各検出器の配置は図 2.3 のようになる。

本節では Belle II 検出器を構成する様々な検出器について述べ、それぞれの検出器の目的や性能について述べる。

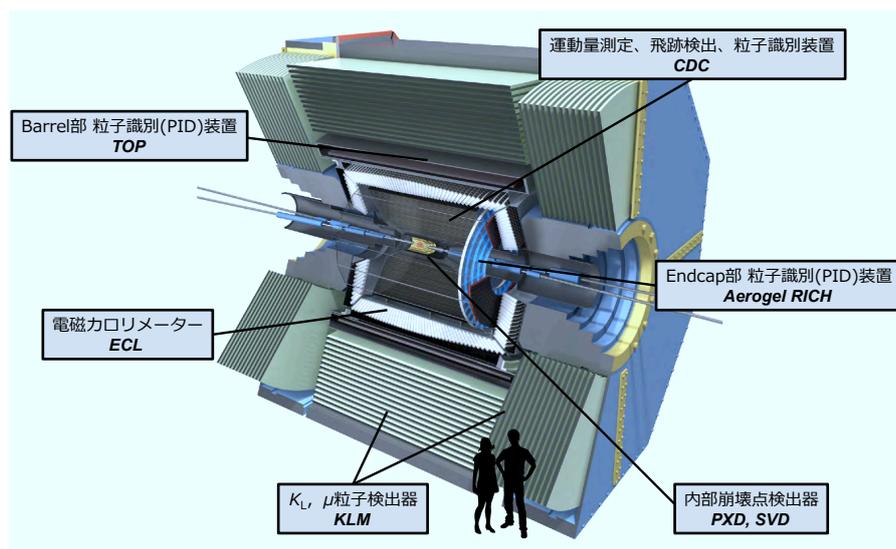


図 2.2: Belle II detector の完成予想図。7 種類の検出器で構成される [11]

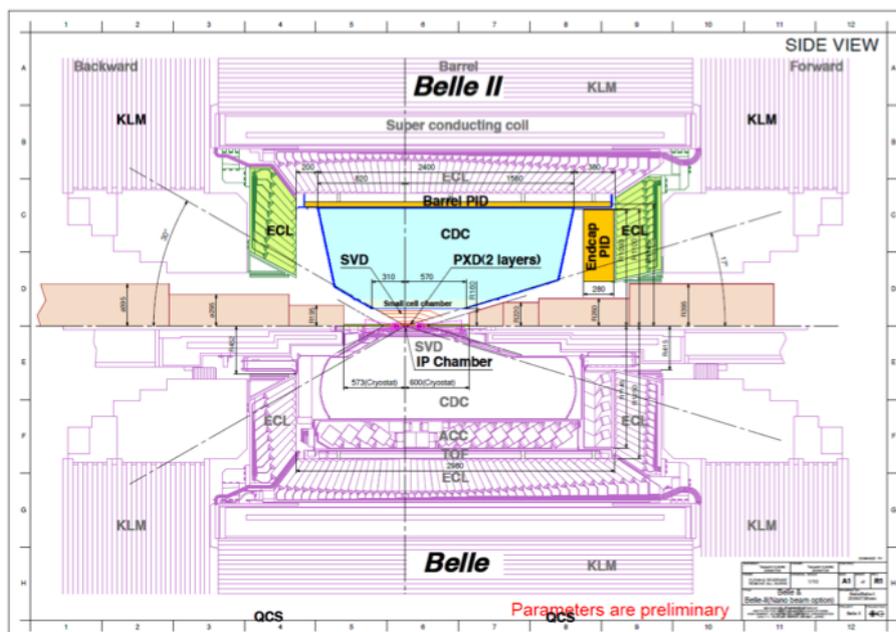


図 2.3: 上半分が Belle 検出器, Belle II 検出器の断面図

2.2.1 PXD,SVD

SVD(Silicon Vertex Detector) と PXD(Pixel Detector) は B 中間子の崩壊点の位置を測定するための検出器である。B 中間子の崩壊点位置の測定による崩壊時間差 Δt の決定は CP 非対称度の測定のために重要である。衝突点でのビームパイプの内径は 30mm から 20mm へと細くなるため、これまで検出器を置くことができなかったスペースに PXD を設置し、崩壊点位置検出器を設置することで測定精度の向上を図る。図 2.4(a) のような構造となる。

また、PXD のピクセルサイズは $50 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ である。PXD と SVD の組み合わせにより $20 \mu\text{m}$ の精度で崩壊点位置の検出を行う。[1]

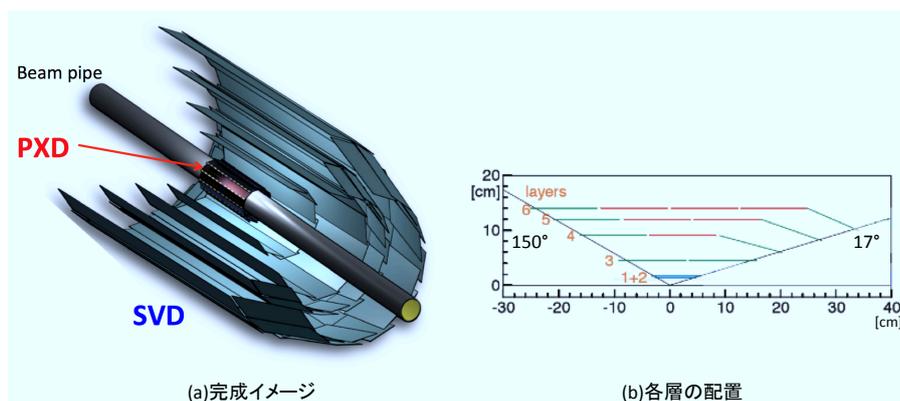


図 2.4: PXD(2層) と SVD(4層)

2.2.2 CDC

CDC(Central Drift Chamber) は Belle II 検出器において荷電粒子の運動量測定、低エネルギー領域の粒子識別、トリガー情報を与える役割を持つドリフトチェンバーである。CDC には 50%の He ガスと 50%のエタンガスが用いられ、14,336 本のセンスワイヤーが用いられる。ワイヤー配置図を図 2.5 に示す。

Belle II 検出器にはビーム軸方向に対して約 1.5 T の磁場が印加される。そのため、荷電粒子に対して Lorentz 力が加わり、飛跡が湾曲する。荷電粒子の運動は以下の式 (3.4) にしたがう。

$$p[\text{GeV}/c] = 0.3\rho[\text{m}]B[\text{T}] \quad (2.1)$$

湾曲した荷電粒子の曲率 ρ を測定することで運動量を求めることができる。

また、センスワイヤーに検出される信号電圧から、荷電粒子が CDC を通過した際

に単位長さ当たり落としたエネルギー dE/dx を測定することで $1 \text{ GeV}/c$ 以下の低エネルギー領域の粒子識別を行う。A-RICH や TOP に到達しない低いエネルギー領域の荷電粒子の識別も CDC 単体で識別可能である。図 2.6 に各荷電粒子のエネルギーと dE/dx の関係を示す。このように $1 \text{ GeV}/c$ 以下の低いエネルギー領域で粒子識別機能が有効であることがわかる。

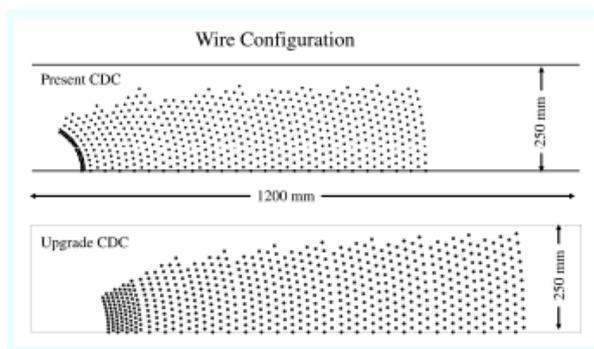


図 2.5: Belle と Belle II での CDC のセンスワイヤーの配置の比較

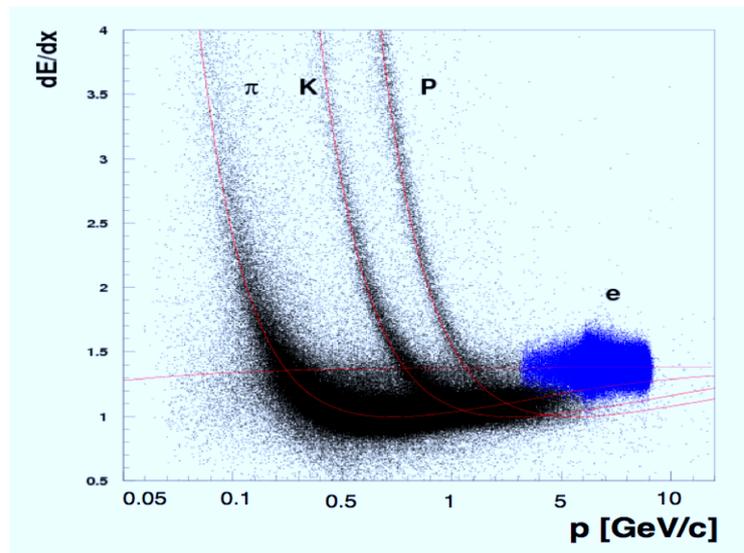


図 2.6: CDC による粒子識別機能。横軸が荷電粒子の運動量, 縦軸が単位長さ当たりのエネルギー損失量を表す

2.2.3 TOP

TOP(Time of Propagation Counter)とは Belle 検出器の Barrel 部に到達した荷電粒子の識別, 特に K/π 識別を行うための検出器である。TOP は荷電粒子の速度が物質中の光速を超えることで生じる Cherenkov 光を検出することにより粒子識別を行う Cherenkov 検出器である。

Detection of Internally Reflected Cherenkov light(DIRC) と呼ばれる図 2.7 のように K 中間子と π 中間子がクォーツを通過した際に発生する Cherenkov 光のリングイメージから得られる半径の差と, Cherenkov 光の放射角の差により, クォーツ内での Cherenkov 光の飛跡が異なることで生じる伝搬時間の差を測定することで粒子識別を行う装置である。図 2.7 のクォーツにおける K 中間子と π 中間子の Cherenkov 光の伝搬時間差は 200 ps 程度であることから, 光検出器は 35 ps 未満という非常に高い時間分解能であることが求められる。光検出器には図 2.8 の浜松ホトニクス製の MCP-PMT(Micro Channel Plate PhotoMultiplier Tube) を用いる。なお, TOP は Belle II のために新たに開発されている粒子識別装置である。

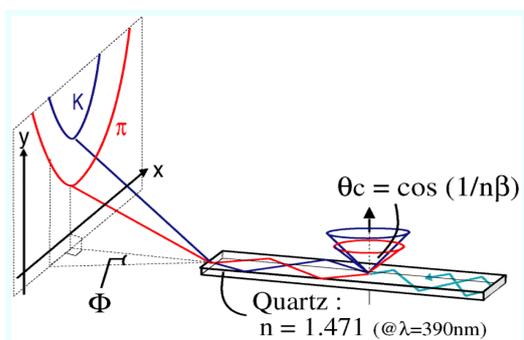


図 2.7: DIRC の原理



図 2.8: TOP で使用する MCP-PMT

2.2.4 Aerogel RICH

A-RICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter)とは Belle II 検出器の Endcap 部に到達した荷電粒子の粒子識別, 特に K/π 識別を行うための検出器である。A-RICH ではシリカエアロゲルを輻射体として用いて Cherenkov 光のリングイメージを捉えることで K 中間子と π 中間子の識別を行う。A-RICH の原理については次章で詳しく記述する。

2.2.5 ECL

ECL(Electromagnetic Calorimeter)とは Belle II 検出器においてエネルギー測定を行うための検出器である。 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ におけるエネルギー分解能は1.7%である。なお、このプロセスにおける光子のエネルギーは $3.5 \text{ GeV} < E_\gamma < 8 \text{ GeV}$ である。

B^0 の崩壊のうち $1/3$ は π^0 を生成し、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ がその主な崩壊モードとなるため、光子の正確なエネルギー測定は Belle II 実験において非常に重要である。カロリメータの素材には発光量が多く、輻射長が短い CsI(Tl) が採用されている。ただし、Endcap 部には信号のパイルアップを防ぐため、蛍光時間の短い Tl を含まない CsI 結晶の使用が計画されている。Belle II 検出器では高バックグラウンドノイズに対応するために FADC により波形を取得してフィットすることが計画されている。

2.2.6 KLM

KLM(K_L^0 and muon detector)とは K_L^0 中間子の検出と μ 粒子の同定を行うための検出器である。

KLM は Resistive Plate Counter(RPC)15 層と鉄 14 層のサンドイッチ構造となっており、荷電粒子が通過するとガラス電極の間に蓄えられた電荷がストリーマ放電を起こす。放電が起きた位置から K_L^0 、および μ 粒子の通過位置を測定する。

B factory 実験において μ 粒子は B 中間子の Flavor tagging に利用するため、高い検出効率と粒子同定の精度が必要である。しかし、 μ 粒子(質量 105 MeV)と π 中間子(質量 140 MeV)は質量が近く、A-RICH や TOP のみでの同定は困難である。 μ 粒子の透過性が高く、寿命が長いため、KLM の鉄層を多く貫通するため、その飛跡を観測することで μ 粒子の同定を行うことができる。

また、 K_L^0 中間子も寿命が長いため、KLM まで到達する。 K_L^0 は透過性の高い μ 粒子とは異なり、ECL や KLM の物質と強い相互作用をし、ハドロンシャワーを発生させる。このハドロンシャワーを観測することで K_L^0 中間子の運動方向を検出することができる。なお、 K_L^0 中間子のバックグラウンドは中性子である。その fake rate はシミュレーションにより < 0.01 と予想されている。

第3章 Endcap PID装置のアップグレード

レード

Belle II 実験では新しい物理の効果を観測するために K/π 識別可能な運動量領域を Belle 実験時よりも拡張する必要がある。そこで Belle II 実験での Endcap PID 装置として A-RICH を新たに開発している。本章では Belle II 実験のための Endcap PID 装置のアップグレード計画について記述する。

3.1 Cherenkov 放射の原理

荷電粒子が屈折率 n の物質中を、物質中の光速 c/n よりも大きい速度で通過すると、物質内部の電場分布が乱され局所的な分極状態となる。この分極が元に戻ろうとする際に電場の変化分が光子として放出される。これを Cherenkov 放射という。この際に発生した Cherenkov 光は図 3.1 のように荷電粒子の運動方向に対し θ_C の角度に放出される。

屈折率と放射角 θ_C は以下のような関係になる。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (3.1)$$

ここで、 $\beta \equiv v/c$ である。Cherenkov 光は後方に放射されないとすると、 $0 < \theta < \pi/2$ であるから、 $0 < \cos \theta < 1$ となり

$$\frac{1}{n\beta} < 1 \quad (3.2)$$

という Cherenkov 光放射条件が得られる。式 (3.2) より Cherenkov 光が発生する条件は荷電粒子の速度に依存することがわかる。また、Cherenkov 光の波長が λ から $\lambda + d\lambda$ であるときに発生する光子数 dN は以下の式で与えられる。

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta_C \quad (3.3)$$

α は微細構造定数、 z は荷電粒子の電荷量である。

Belle II 実験において観測される粒子のふるまいは相対論に従うため、速度 v 、質

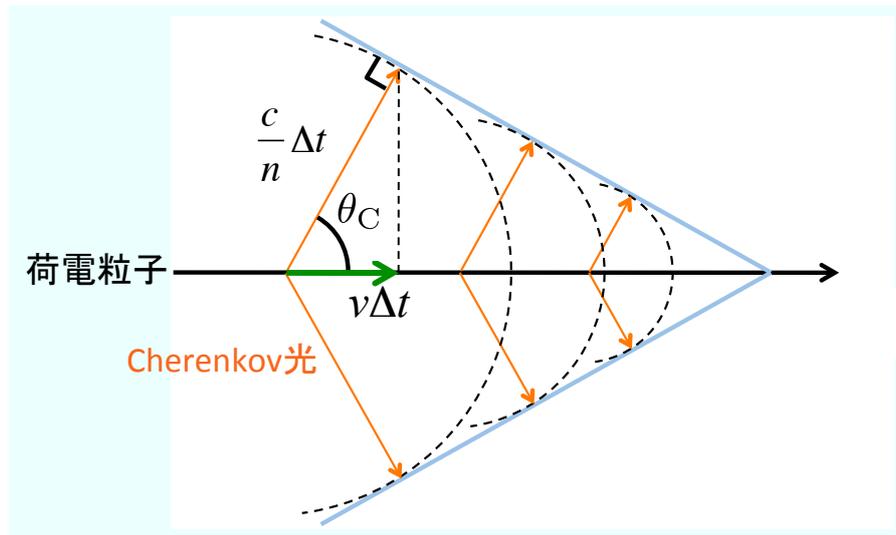


図 3.1: 速度 v で屈折率 n の物質中を運動する際に発生する Cherenkov 光とその放射角 θ_C の関係図。

量 m の粒子の運動量は以下のように記述される。

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

式 (3.4) を Cherenkov 光の屈折率と放射角の関係式 (3.1) に代入すると以下のような式を得る。

$$p = \frac{m}{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_C - 1}} \quad (3.5)$$

を得る。式 (3.5) は運動量 p と Cherenkov 光放射角の関係を表しており、質量 m が異なる同じ運動量の粒子によって放射される Cherenkov 光の放射角が異なることを示している。

更に式 (3.2) により

$$p > \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3.6)$$

を得る。式 (3.6) は運動量に対する Cherenkov 放射条件を表し、その放射条件は粒子の質量 m によって異なることを示している。

このように Cherenkov 光の放射条件、およびその放射角 θ_C は荷電粒子が通過する物質の屈折率 n 、運動量 p 、質量 m に依存する。

3.2 Belle 実験における K/π 識別

前節に記述したように Cherenkov 光放射条件は輻射体の屈折率 n が一定のとき、質量が異なる粒子で閾値運動量が異なる。図 3.2 は屈折率 n に対して、 K 中間子と π 中間子の Cherenkov 光発生のための閾値運動量 p_{th} を示したグラフである。

Belle 検出器における Aerogel Cherenkov Counter(ACC) はこの原理を応用した粒子識別装置である。図 3.3 にその構造を示す。ACC は輻射体にシリカエアロゲル、光検出器に光電子増倍管を用いた。

ACC ではシリカエアロゲルの屈折率を Barrel 部で 1.010~1.028 に、Endcap 部では 1.030 にして使用していた。Endcap 部で屈折率が 1.030 が採用されているのは Flavor tagging に特化させるためである。なお、ACC での K/π の誤識別率は 10% 程度であった。

輻射体の屈折率 $n = 1.03$ のとき、 K 中間子が輻射体であるシリカエアロゲルを通

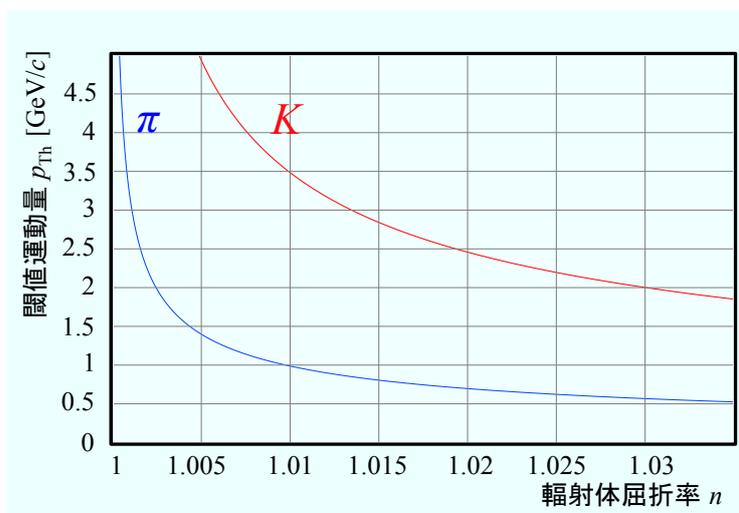


図 3.2: 屈折率 n に対する K 中間子と π 中間子の閾値運動量 p_{th} を示したグラフ

過した際に Cherenkov 光が発生せずに π 中間子が通過した時に発生するための運動量の条件は、 $0.5 < p < 2.0$ GeV/c である。したがって、この運動量領域が Endcap 部における ACC の識別可能な領域である。

図 3.4 は K 中間子の検出効率、および π 中間子の誤識別率を表している。これより高い運動量領域において fake rate が高くなっていることがわかる。一方で、Endcap 領域には 2.0 GeV/c 以上の運動量を持つ K 中間子や π 中間子が多く飛来することが予想されている。[12]Belle II 実験においては新しい物理の観測や更に精度の高い CP 対称性の破れの観測のために高い運動量領域での K/π 識別が求められる。

Belle II 検出器では Endcap 部における更なる識別精度向上、および識別可能な運

動量領域拡張のため、Cherenkov 光をリングイメージとして捉えるための装置として Aerogel RICH の開発を行なっている。次節にその詳細を述べる。

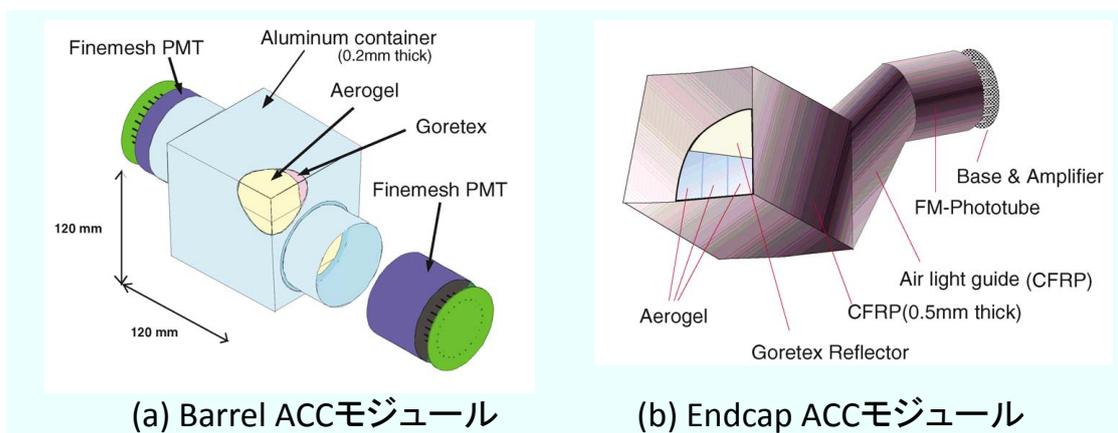


図 3.3: Belle 実験において粒子識別を担った ACC のモジュール，構造は異なるが基本的な原理は同じである。

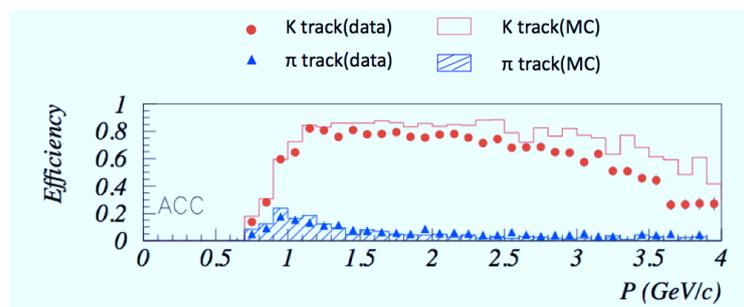


図 3.4: Belle 実験のデータ，およびモンテカルロシミュレーションによる K 中間子の検出効率と π 中間子による誤識別率を表す。[12]

3.3 A-RICH の原理

RICH(Ring Imaging Cherenkov counter) とは荷電粒子が輻射体を通過した際に発生する Cherenkov 光のリングイメージを捉えることによって Cherenkov 放射角 θ_c を測定し，荷電粒子の識別を行うための装置である。Belle II 実験において，Endcap 部ではシリカエアロゲルを輻射体とした RICH 検出器である A-RICH を使用する。

Cherenkov 放射角 θ_c と粒子の運動量 p の関係は式 (3.6) を変形することで以下のように表される。

$$m = p\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1} \quad (3.7)$$

この関係式より輻射体の屈折率が一定であり運動量が求められている場合, Cherenkov 放射角を測定することにより輻射体を通過した荷電粒子の質量が明らかになることを示している。そのため, 質量の異なる荷電粒子の識別が可能となる。

Belle II 検出器の場合, 粒子の運動量は CDC によって測定によりされる。したがって A-RICH では Cherenkov 光の放射角 θ_c を測定することによって粒子識別を行うことができる。

なお, A-RICH では図 3.6 のように屈折率の異なるシリカエアロゲルを 2 枚配置する方式を採用することによって Cherenkov 光子の広がりを抑え, 角度分解能の向上を図る。[1]

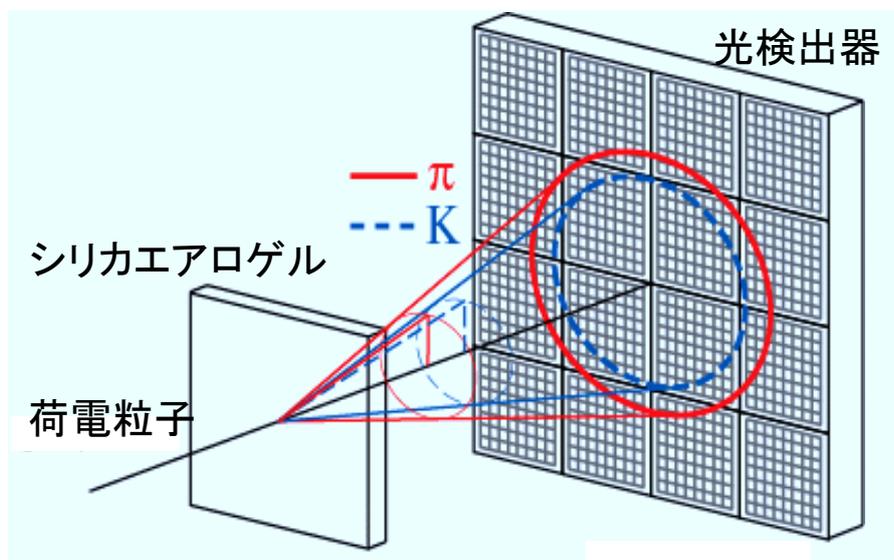


図 3.5: A-RICH の概念図。Cherenkov 放射角の差を測定することで K/π 識別を行う。

図 3.6 のように屈折率の異なる輻射体を 2 層配置した場合, 検出光子数は 2 つのシリカエアロゲルにおいて発生し, 光検出器によって検出される Cherenkov 光の総和になる。そのため, 荷電粒子が通過した際に n_1, n_2 の屈折率のシリカエアロゲルで発生する光子数をそれぞれ N_1, N_2 とし, その総和 N_{phot} とすると以下のように表せる。

$$N_{phot} = N_1 + N_2 \quad (3.8)$$

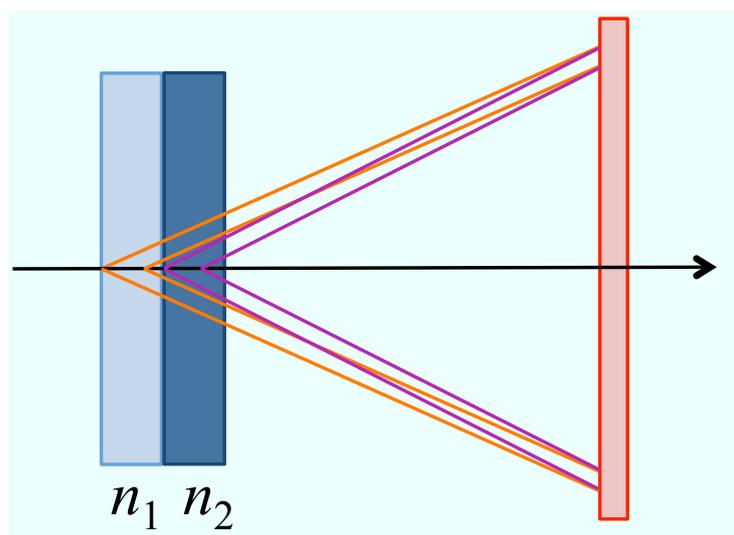


図 3.6: 複層における Cherenkov 放射を表した概念図

なお, RICH による粒子識別能力 N_{SD} は以下の式で求められる。

$$N_{SD} = \frac{|\theta_1 - \theta_2|}{\sigma_{track}} = \frac{|\theta_1 - \theta_2|}{\sigma_\theta} \sqrt{N_{track}} \quad (3.9)$$

ここで, θ_1, θ_2 は識別の対象とする荷電粒子の Cherenkov 放射角, N_{track} は $N_{p.e.}$ 1トラックあたりの検出光子数である。 σ_θ は全トラックにおける角度分解能、 σ_{track} は 1トラックあたりの角度分解能で σ_θ/N_{track} である。我々が識別の対象とする主な荷電粒子は K 中間子と π 中間子であり, $p=4 \text{ GeV}/c$, $n = 1.05$ のとき, $\theta_\pi = 308 \text{ mrad}$, $\theta_K = 285 \text{ mrad}$ である。したがって, 放射角度差 $\theta_1 - \theta_2 \simeq 23 \text{ mrad}$ となる。A-RICH では 4σ の精度での K/π 識別を目指している。

3.4 A-RICH の開発

A-RICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter) は輻射体としてシリカエアロゲル, 光検出器としてマルチアノード型 144ch HAPD(Hybrid Avalanche photo detector), およびその読み出しシステムによって構成される。

図 3.7 に A-RICH の完成イメージを示す。それぞれ, 青色の部分がシリカエアロゲル, 赤色の部分 HAPD, 緑色の部分が読み出しシステムを示している。このように A-RICH は同心円状に設置される。なお, A-RICH には HAPD を 456 個使用する予定である。

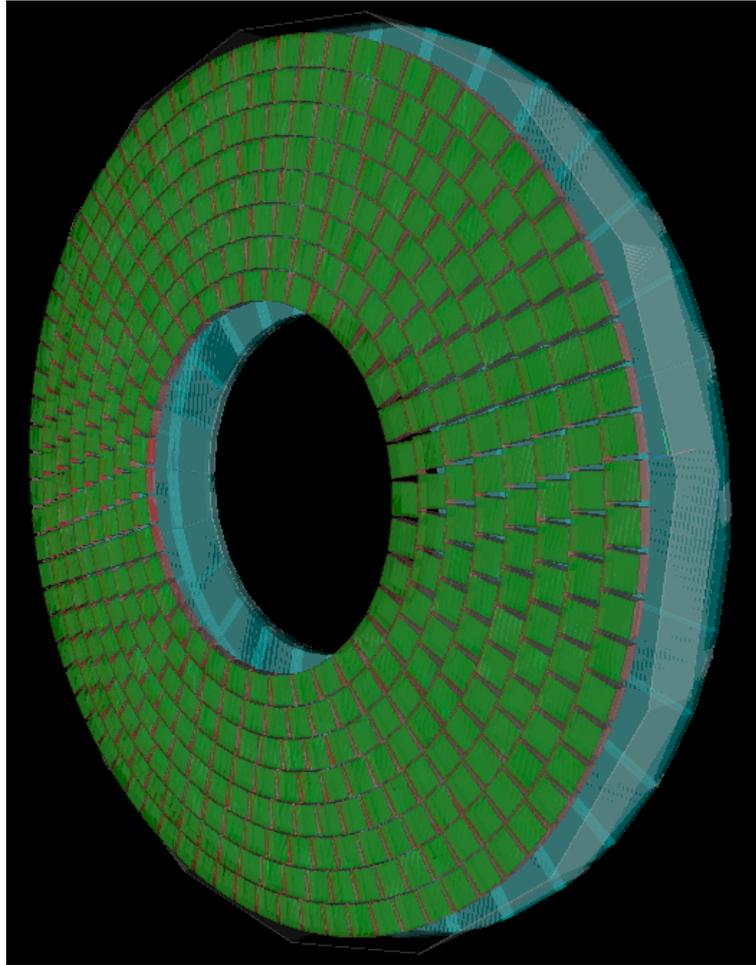


図 3.7: Aerogel RICH の完成イメージ

3.5 シリカエアロゲル

Cherenkov 光を検出するために高い透過性を持ち、4 GeV/c の運動量を持つ K 中間子と π 中間子の識別を精度良く行うためには屈折率が 1.04~1.06 の範囲にあることが要求される。[1] シリカエアロゲルは Belle ACC でも使用された物質であり図 3.8 のような構造となっており、体積のうち 98% は空気が占めている。また、粒子径が数十 nm となり可視光の波長と比較して短い。このような特殊な構造から固体でありながら低屈折率、低密度、高透明度を実現している。

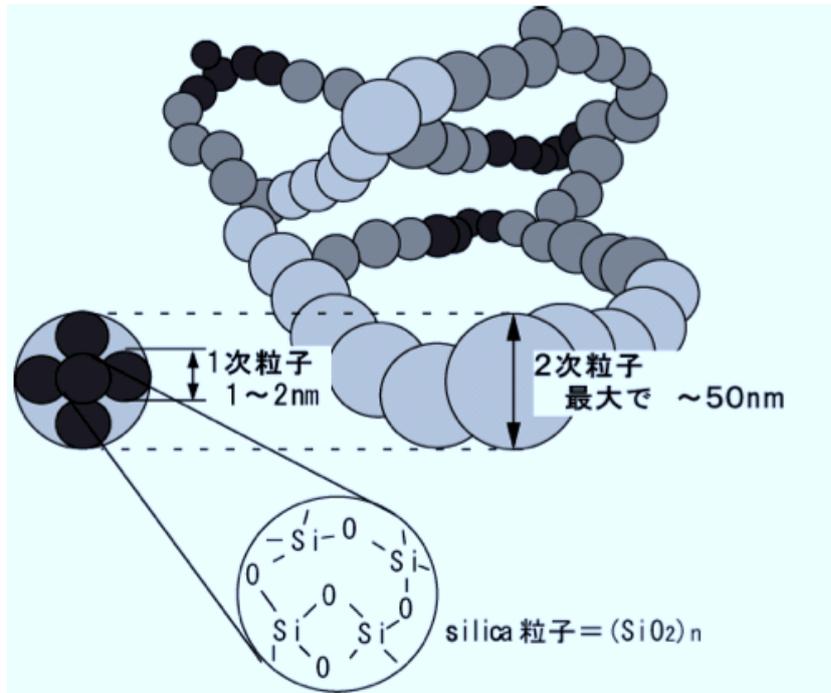


図 3.8: シリカエアロゲルの構造。SiO₂ の 3 次元的な構造が 3 次元的に配列している。

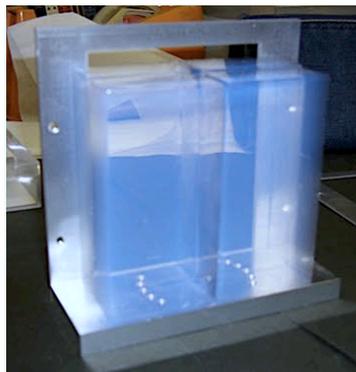


図 3.9: Aerogel RICH で使用するシリカエアロゲル

3.6 HAPD

Aerogel RICH では π 中間子と K 中間子の Cherenkov 放射角度の差を観測することによって粒子識別を行うため、光検出器は Cherenkov 放射角の差を測定するための位置分解能を持つ必要がある。 π 中間子と K 中間子が 4 GeV/c の運動量を持って

いた場合、その放射角度の差は、 $\theta_{\pi} - \theta_K \simeq 23 \text{ mrad}$ となり、角度差による検出器面上での半径の差は約 5 mm である。そのため、光検出器は 5 mm 以下の位置分解能を持つことが要求される。そのため、図 3.11 のように HAPD のピクセルサイズは 4.9 mm × 4.9 mm となっている。また、シリカエアロゲルから放射される Cherenkov 光を検出するために 1 光子検出が可能であること、検出器の光電面に対して垂直に 1.5 T 程度の磁場中での動作することが要求される。これらの要求性能を満たす光検出器として我々は 144ch マルチアノード型 HAPD を浜松ホトニクス (株) と共同で開発している。図 3.10 にその外観、図 3.11 にその寸法を示す。

増幅原理

HAPD における光電子の増幅原理を以下に記述する。

- 光電面に光が入射すると光電効果により光電子が放出される
- 図 3.12(a) のように放出された光電子が真空管部に印加した 7~8.5kV の高電圧によって加速され APD に入射する
- APD に入射した光電子はエネルギーを落として停止する。この時、平均 3.6eV あたり 1 対の電子-正孔対を生成する。約 1,500 個の電子-正孔対が生成される。(打ち込み増幅)
- 図 3.12(b) のように APD 内部で生成された電子-正孔対は APD に印加された逆バイアス電圧によってそれぞれ逆方向に運動する。この過程で Avalanche 増幅領域を通過した際に Si 原子の価電子帯から電子を励起させ、新たな電子-正孔対を生成する。新たに生じた電子-正孔対がこの衝突を繰り返し雪崩的に新たな電子-正孔対を生成していく。(Avalanche 増幅)

このように HAPD は高電圧による打ち込み増幅と Avalanche 増幅の 2 段階で増幅を行う。また、HAPD の性能として重要となるのは 1 光子検出機能である。初段増幅である打ち込み増幅が高いことによって増幅過程でのゆらぎが少なくなるため、高い S/N での 1 光子検出が可能となる。



図 3.10: 光検出器 HAPD

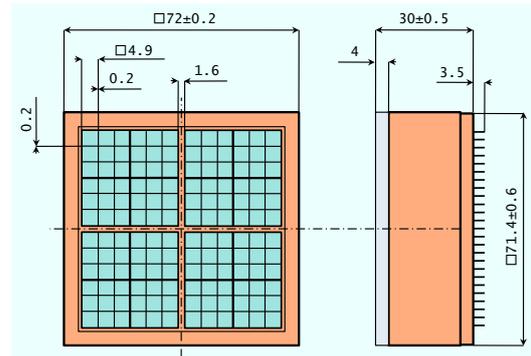


図 3.11: HAPD の設計図

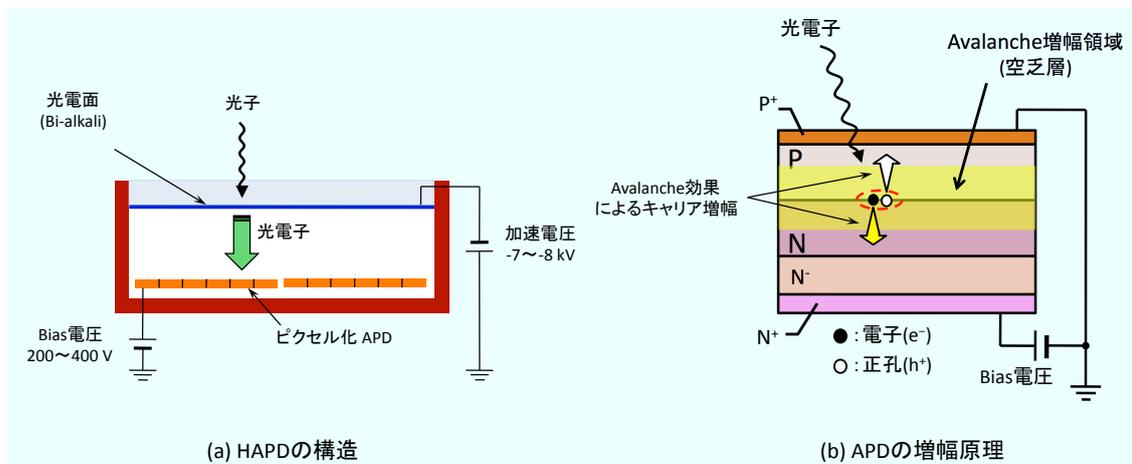


図 3.12: HAPD の増幅原理

3.6.1 HAPD の中性子対策

Belle II 実験では 10 年間で 10^{12} n/cm^2 程度の中性子が飛来することが予測されている。A-RICH に飛来する中性子は主にビームパイプ内で起こるタウショック散乱, Radiative Bhabha 散乱によって生成される。

タウショック散乱とは同一バンチ内のビーム粒子が衝突することによって粒子の運動量の変化が起こる現象である。運動量の変化によって、ビームの軌道から外れた粒子がビームパイプに衝突し、シャワーを生成する。この際に生じた中性子が A-RICH に到達する。

Radiative Bhabha 散乱とは図 3.13 (右図) のようなダイアグラムで書き表すことができる電子、陽電子の光子が生じる散乱である。図 3.13(左図) のようにビームパイプ内で起こる Radiative Bhabha 散乱によって生じたガンマ線が検出器外部のビームパイプや電磁石などの構造体に衝突して相互作用を起こし、中性子を叩き出す。

このようにして発生した中性子が HAPD に飛来すると APD 部において Frenkel 欠陥と呼ばれる格子欠陥が起こると予想される。APD は Si と微量の不純物原子が規則正しく配列した半導体で構成されており、図 3.14(a) のように中性子が飛来すると、格子原子を叩き出し正の電荷を帯びた格子空孔を生み出す。これにより図 3.14(c) のようにエネルギーギャップの間に中間準位が生じる。

そのため、図 3.14(b) のように通常は高いエネルギーギャップにより伝導帯に励起しなかった束縛電子がこの中間準位を利用して伝導帯へと励起しやすくなる。このようにして通常は流れない電流 (リーク電流) が測定回路系のノイズとして観測され性能悪化を招く。

そこで 2010 年に茨城県東海村の原子炉「弥生」にて APD の P 層や N 層の厚さの違うサンプル、および HAPD に中性子照射試験を行い、その前後で性能の比較を行った。その結果、APD 部分の P 層の薄いサンプルの方がリーク電流は少ないという結果が得られたが、照射後の 1 光子検出信号の S/N は 4~5 程度となった。[20] しかし、A-RICH の目標は S/N~7 であるため更なる対策が必要である。

その対策の一つとして、フロントエンドエレクトロニクスとして使用する ASIC の Shaping time を短くすることによって読み出し時のノイズを抑えることが有効である。これについては次章に詳しく記述する。

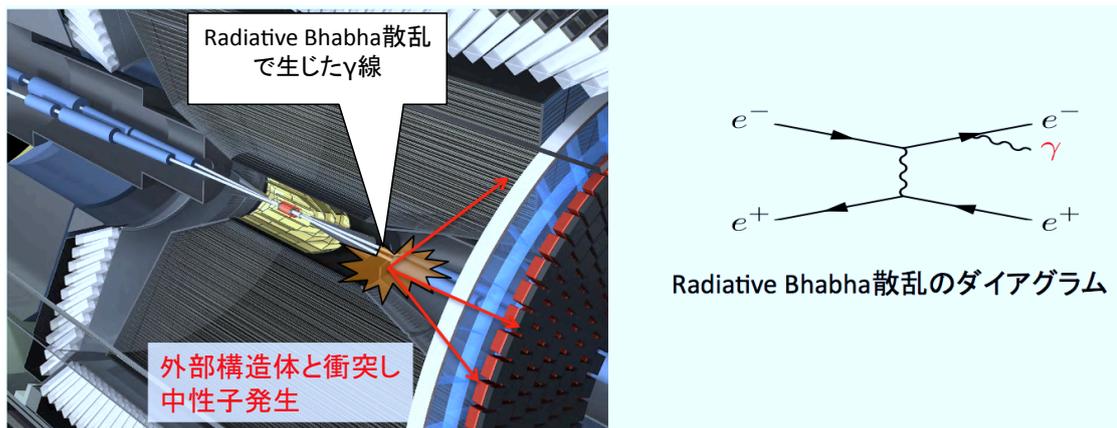


図 3.13: Radiative Bhabha 散乱によりガンマ線が生じ、検出器外の構造体と衝突する

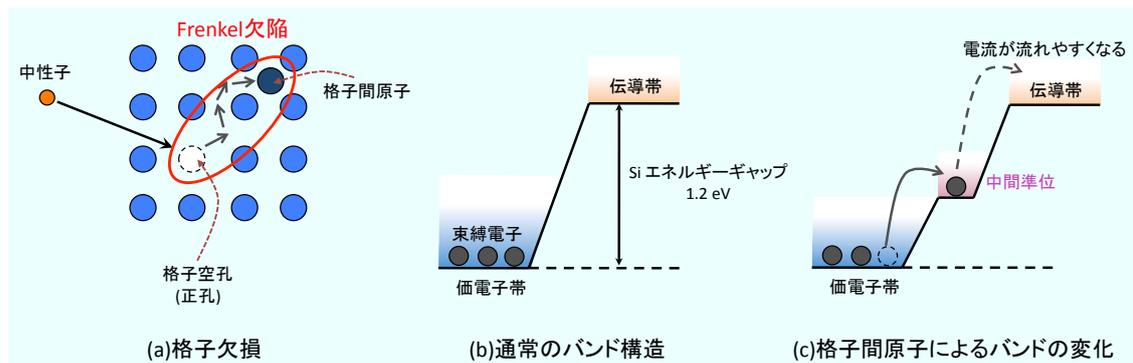


図 3.14: 中性子が飛来することにより APD の Si の格子に Frenkel 欠陥が起こり、中間準位が生じリーク電流が増加する

3.7 読み出しシステム

フロントエンド部

A-RICH の読み出しシステムには以下の要求性能を満たす必要がある。

- (a) 高増幅、低雑音の増幅機能
- (b) コンパクト化
- (c) 多チャンネルの一括読み出しが可能であること

(a) は HAPD の増幅率が $\mathcal{O}(\sim 10^4)$ であり、一般的な光電子増倍管の増幅率は $\mathcal{O}(\sim 10^7)$ と比べて低い。そのため、高い S/N 比を実現するためには検出器からの信号を低雑音の環境で高増幅する必要があることによる要求である。

(b) は A-RICH を設置するための空間的制約による要求である。図 3.15 のようにビーム軸方向に対して A-RICH の構成要素を 280 mm の空間に全て設置しなくてはならない。A-RICH の構成要素はシリカエアロゲル、HAPD、読み出しシステムから成る。シリカエアロゲルは十分な数の Cherenkov 光を発生させるために 40 mm の厚さが必要であり、その拡散領域としてシリカエアロゲルから HAPD の光電面までに 200 mm の距離が必要である。かつ、HAPD は 30 mm の厚さを持つため、読み出し用エレクトロニクスの設置空間は 50 mm 以下となる。この空間にケーブルなども含む全ての読み出しシステムを設置することが要求される。

(c) は 1 つあたり 144 チャンネルの HAPD を 456 台を同時に読み出すための要求である。読み出しシステムは合計で約 70,000 チャンネルの同時読み出しを行う。

これらの要求を満たすため、我々は読み出しシステムに ASIC と FPGA を採用した。ASIC を採用した理由は汎用 IC を組み合わせたとような回路と異なり、個別に設

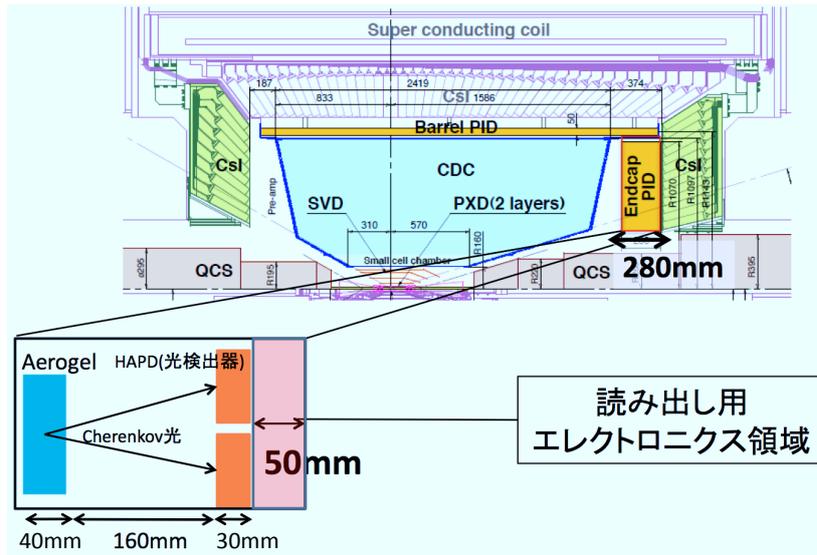


図 3.15: Belle II 検出器における Aerogel RICH の設置空間。読み出し用エレクトロニクスの設置空間は 50mm 以下である。

計を行い1つのICとすることで高集積化が可能であり、かつ高速動作に適しているためである。我々は専用の読み出し用ASICとして「SAシリーズ」の開発を2007年より開発を行っている。

FPGAを採用した理由はプログラムにより回路設計ができるため、柔軟な読み出しが可能であり Belle II 検出器全体のDAQシステムに対応させることができ、多チャンネルの一括読み出しに適しているためである。

また、RICHの読み出しシステムにおいて重要な機能は1光子判別である。そのため、読み出しシステムの機能としては波高値の測定といった処理は必要なく、光子検出の有無というビット情報の処理だけで十分である。

そのため、A-RICHのフロントエンドでは信号を増幅、整形し、1光子検出判定を行う回路構成とする。具体的には図3.16に示すようにHAPDからの入力信号を前置増幅器により増幅後、波形のパルス幅を波形整形器で調節し、アナログ処理された波形を比較器に通し、設定した閾値電圧よりアナログ信号の波高値が大きい場合、1光子検出信号(デジタル信号)を出力する機能となっている。

そして、比較器から出力された検出信号はFPGAによってデジタル処理される。具体的にはFPGA内のシフトレジスタにクロックのタイミングでヒット情報を記録していき、トリガーが入力された瞬間に4bit分(4クロック分)の情報を出力する。4bitのうち1bitでもヒット信号が出力されている場合は1光子検出とみなす。

また、アナログ信号処理をASIC、デジタル信号処理をFPGAに分けることによっ

⁰ヒット情報とは光子検出の有無のビット信号を指す。

て、ノイズの原因となるアナログ・デジタル混在を避けることもできる。

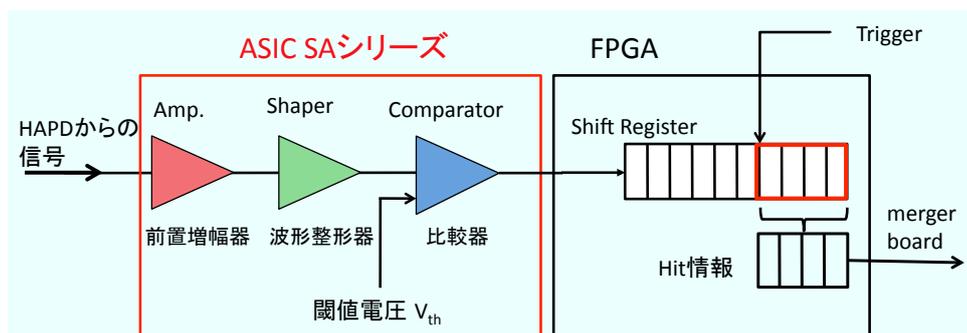


図 3.16: フロントエンドエレクトロニクスの回路構成。アナログ信号処理を ASIC でデジタル信号処理は FPGA で行う

バックエンド部

Belle II 実験においてデータ収集は Belle2Link という光ファイバーケーブルを用いた Belle II 全体で共通のシステムを使用することが決まっている。[1] そこで、フロントエンド部から出力されたデジタル信号を図 3.17 のように Merger Board を中継する。Merger Board には FPGA が搭載されており、FPGA でデータ圧縮を行い、Belle2Link に信号を送る。このようにして A-RICH からの信号を Belle II 検出器全体の DAQ システムに送り出す。

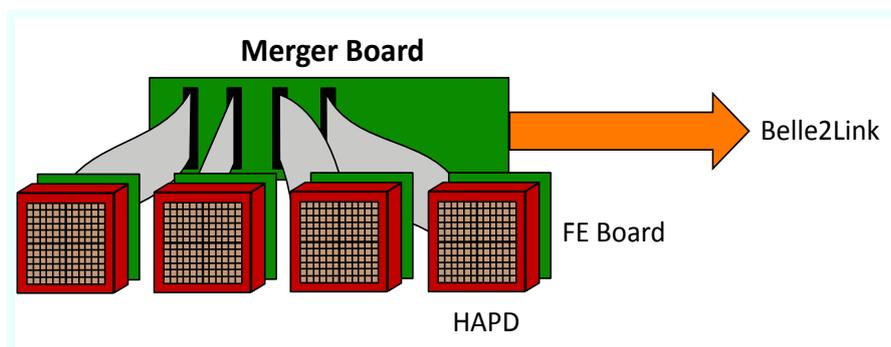


図 3.17: Merger Board の概念図

第4章 読み出し用 ASIC

シミュレーションによる 動作検証

我々は A-RICH のフロントエンドに使用する読み出し用 Application Specific Integrated Circuit(ASIC)である SA シリーズを開発している。本章では SA シリーズの最終版として Belle II 実験に使用することを想定して開発を行っている SA03 シミュレーションによる動作検証結果を記述する。

4.1 SA シリーズ

SA シリーズとは A-RICH に用いる読み出し用 ASIC である。SA シリーズの回路構成を図 4.1 に示す。このように SA シリーズは増幅器 (Amp.), 波形整形器 (Shaper), 2 種類のオフセット調節回路の後, リーディング型, 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。また, スイッチにより使用する比較器が選択可能である。以下にそれぞれの構成要素について詳しく記述する。

増幅器

SA シリーズの ASIC に内蔵される増幅器は電荷有感型である。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可能である。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) はパルス幅 (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 Shaping time を 250, 500, 750, 1000ns に切り替えることができるように設計された。SA03 は抵抗の切り替えにより Shaping time を調節するよ

f

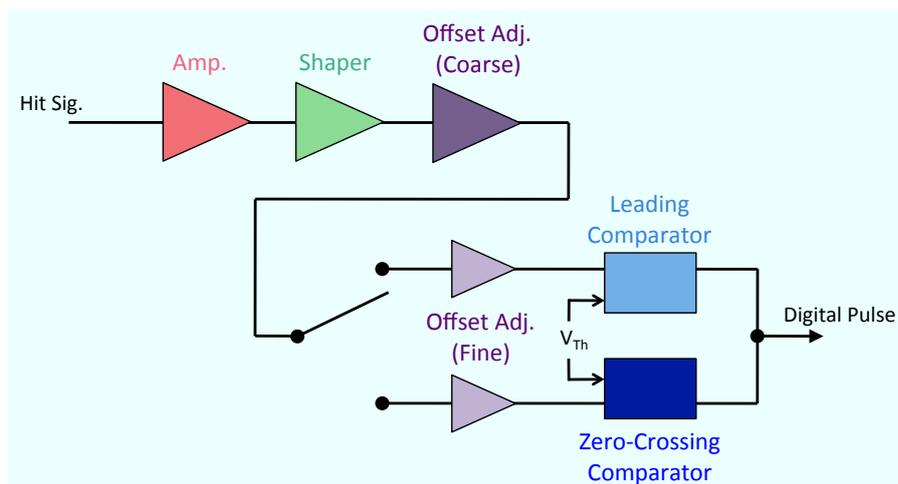


図 4.1: SA シリーズの基本回路構成図

う設計した。Pole-zero 補償回路はアナログ出力信号のアンダーシュートを防ぐために設計した。

オフセット調節回路

適切に 1 光子判別を行うためには比較器に与える閾値電圧を各チャンネル毎に与える必要があるが、各チャンネル毎に閾値電圧を設定した場合、全チャンネル分の ADC が必要であり、回路規模が大きくなってしまう。A-RICH では回路規模をコンパクトにすることが求められるため、この方式は適切でない。

そこで、SA シリーズでは閾値電圧を全チャンネルで共通にし、各チャンネルでオフセット調節を行う方式を採用した。計 256 段階でオフセットを調節するために粗調節 16 段階、微調節 16 段階の 2 段構成となっている。

比較器

比較器は入力されたアナログ信号と閾値電圧 (Threshold Voltage: V_{th}) を比較し、閾値電圧以上の入力がある間に矩形波を出力する回路である。この矩形波をデジタル信号入力として使用する。SA シリーズでは 2 種類の比較器を選択できるようになっている。一つはリーディング型のものであり、一般的な比較器である。図 4.2(a) にその概念を示す。もう一つはゼロクロス型のものであり、アナログ信号の微分波形を反転させた信号を微分波形のベース電圧 (V_{th} とする) をリーディング型比較器を通

すことで、図 4.2(b) のようにアナログ入力信号がピークに達した際に矩形波を出力する。リーディング型の比較器のみを使用した場合に比べ、デジタル出力のタイミングがアナログ信号の波高値に依存しないという特徴がある。

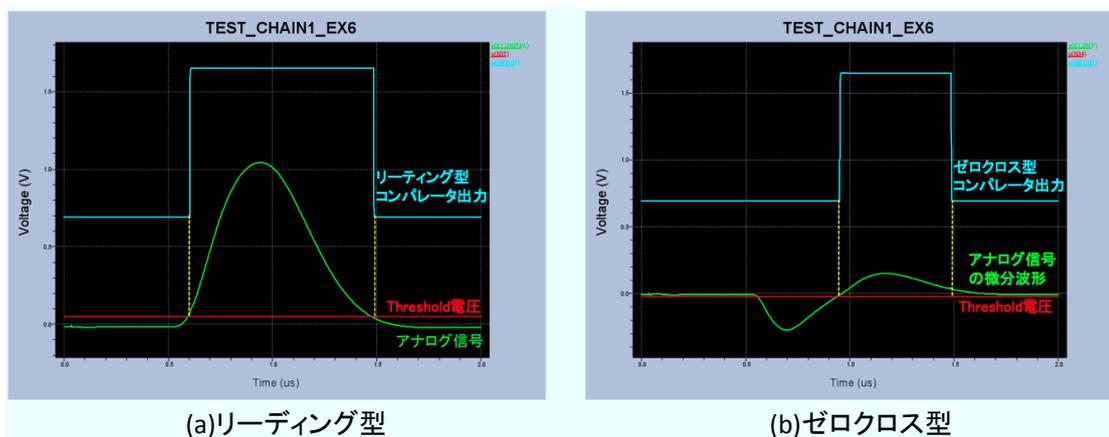


図 4.2: SA02 の比較器の動作シミュレーション。図 (a) はリーディング型比較器の動作を表し、図 (b) はゼロクロス型の動作を表す。

パラメータ設定回路

SA シリーズにはアナログ処理回路に加え、増幅率や Shaping time などの回路パラメータを設定するデジタルスイッチング回路が備わっている。設定パラメータは全チャンネル共通に設定される「グローバルパラメータ」と各チャンネルに設定される「チャンネルパラメータ」の 2 種類ある。表??にチャンネルパラメータを、表 4.2 にパラメータのをまとめる。それぞれの表にパラメータの略称、機能、設定スイッチ (SW) のビット数を示す。

4.2 SA02 の概要

SA02 は 2010 年に開発された読み出し用 ASIC SA シリーズの第 2 版である。SA02 は ROHM CMOS 0.35 μm のプロセスでデザインされている。ノイズ量はバイアス電圧を印加した際の HAPD の容量 80 pF 相当を接着時に 2,000 e^- である。

第 1 版として試作した SA01 は 1 光子相当信号入力時に増幅率が飽和してしまう問題があった。そこで、SA02 は増幅率を SA01 の 1/4 にすることでダイナミックレンジの拡張を行った。また、1 つのチップで処理することができるチャンネル数を 12

表 4.1: SA シリーズのグローバルパラメータ

| パラメータ | 機能 | SW |
|-------------|------------------------|------|
| PHASECMPS | 位相補償用帰還容量の設定 | 2bit |
| GAIN | 増幅率の設定 | 2bit |
| SHAPINGTIME | 波形整形器の Shaping time 設定 | 2bit |
| COMPARATOR | 比較器の選択 | 1bit |
| VRDRIVE | 比較器出力回路の調整 | 8bit |
| MONITOR | アナログ出力位置の変更 | 2bit |
| ID | チップ識別子 (設定不可, 読出し専用) | 9bit |

表 4.2: SA シリーズのチャンネルパラメータ

| パラメータ | 機能 | SW |
|----------------|----------------------------------|------|
| DECAYTIME | 増幅器出力信号の減衰時間の設定 | 3bit |
| OFFSET | オフセット粗調節 | 4bit |
| FINEADJ_UNIPOL | UNIPOL 出力 [†] のオフセット微調節 | 4bit |
| FINEADJ_DIFF | DIFF 出力 [‡] のオフセット微調節 | 4bit |
| TPENB | テストパルス入力許可選択 | 1bit |
| KILL | チャンネル使用許可選択 | 1bit |

[†]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

チャンネルから 36 チャンネルに増加した。表 4.3 に SA02 の各種パラメータの値, およびノイズ量など機能をまとめる。

表 4.3: SA02 の機能

| | |
|-----------------------|------------------------|
| 増幅率 | 19, 22, 32, 61 mV/fC |
| Shaping time | 250, 500, 750, 1000 ns |
| オフセット調節範囲 | 1,000 mV |
| オフセット粗調節 | 60 mV/STEP |
| オフセット微調節 | 6.0 mV/STEP |
| ノイズ量 (80pF の検出器容量接着時) | > 2,000 e ⁻ |

4.3 SA03 への要求性能と改良点

HAPD からの信号読み出し時の等価雑音電子数¹(σ_{enc}) は以下の式で表すことができる。

$$\sigma_{enc}^2 = \frac{(AC_{det})^2}{\tau} + \frac{1}{e} I_{leak} FG\tau \quad (4.1)$$

左辺の σ_{enc} は等価雑音電子数、右辺の A は信号処理回路に依存する定数、 C_{det} は検出器容量、 I_{leak} は APD のリーク電流、 τ は Shaping time、F はノイズ因子 (~ 2)、G は HAPD の APD 部分の増幅率を表す。式 (4.1) により HAPD のリーク電流 (I_{leak}) が増加するとノイズ量もそれに伴い増加することがわかる。前章に記述したように HAPD は Belle II 実験中に中性子により損傷を受け、リーク電流が増加し、読み出し時のノイズ量が増加することが予想される。SA03 では Shaping time を最適化することによって読み出し時のノイズを抑えるよう改良を行った。なお、Shaping time の最適値は 2010 年に中性子を照射した HAPD、APD のリーク電流値から求めた。図 4.3 に式 (4.1) によって計算した Shaping time と等価雑音電子数の関係を示す。これより、Shaping time を $100 < \tau < 200$ [ns] 付近に調節すれば読み出し時のノイズ量を最小限に抑えることができると予想される。そのため、SA03 ではこの範囲に Shaping time を調節できるように設計した。

また、SA02 では Shaping time を切り替える際にはコンデンサの切り替えで行っていたが、SA03 では $100 < \tau < 200$ [ns] の比較的小さい領域に調節するため、容量の切り替えから抵抗の切り替えで Shaping time を調整する方式に変更した。なお、SA02 と同様に SA03 も Shaping time を 4 段階に調節することができるよう設計した。

SA02 の性能は基本的な要求性能を満たしていたため、SA03 におけるゲインなどの Shaping time 以外のパラメータの設計値は基本的に SA02 と同値に設計した。

また、SA02 では図 4.4(上) のように、ゲインやオフセットなどの各種パラメータの読み出しを行う際に一度同じパラメータを書き込み、レジスタに記録されている値を読み出す破壊読み出し方式 (destructive readout) で行っていた。この方式では同一

¹等価雑音電子数とは出力雑音に対応する入力電荷量を素電荷の個数で表したものである。

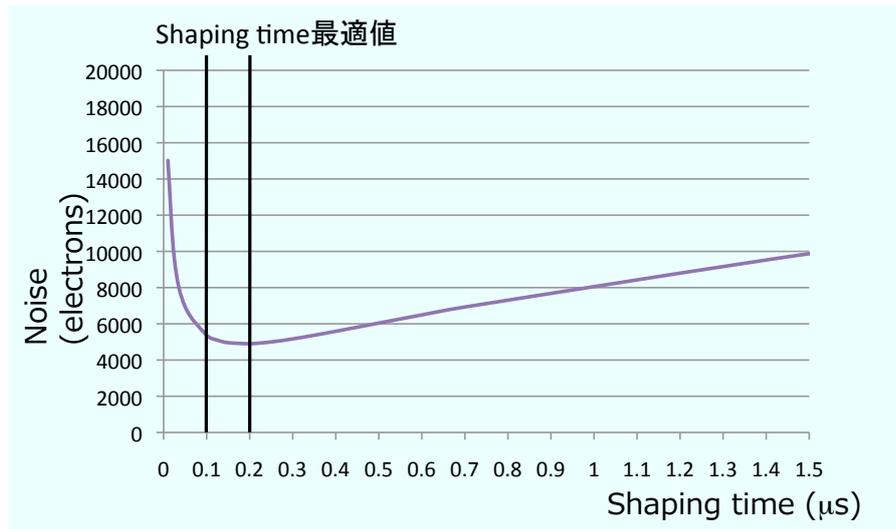


図 4.3: $10^{12}\text{n}/\text{cm}^2$ (Belle II 実験 10 年相当) の中性子が照射した時の APD からの予想されるノイズ量と Shaping time の関係

のパラメータを書き込むまでの時間がデッドタイムとなってしまう。実験中に適切にデータ読み出しを行うためには閾値電圧や増幅率の設定など ASIC の各種パラメータが適切な値に設定されているか確認する必要がある。かつ実験中に飛来する中性子などによって SEE(Single Event Effect) というラッチ内の値が変わってしまう現象が起こり得る。そのため、定期的に ASIC に設定したパラメータを読み出し、確認する必要があるため、パラメータを読み出す度にデッドタイムを作ってしまうことは機能的に問題である。

そのため、SA03 では図 4.4(下) のようにパラメータの読み出しを非破壊読み出し方式 (non-destructive readout) に変更した。図 4.4 のように ASIC 内のパラメータを設定するためのシフトレジスタを 1 本から 2 本に増やし 1 本はデータ保持用レジスタとして使用し、もう 1 本はパラメータ出力用レジスタとして使用する。具体的にはパラメータを設定する際に 2 本のレジスタに同時にパラメータを送り、読み出す際には出力用レジスタから出力する。その後データ保持用レジスタの値を書き込み用レジスタに保持する。これによりパラメータの非破壊読み出しを行う。

また、SA03 のパラメータ設定用レジスタを Dual interlocked Cell と呼ばれる回路規模が 2 倍になってしまうが、レジスタを二重化し、一方のレジスタがフリップしても自動修正を行うことができる SEE に強い回路構成にした。[14]

このような変更を行った SA03 の動作検証を行うためにアナログ部、およびデジタル部のシミュレーションを行った。以下、その結果について記述する。

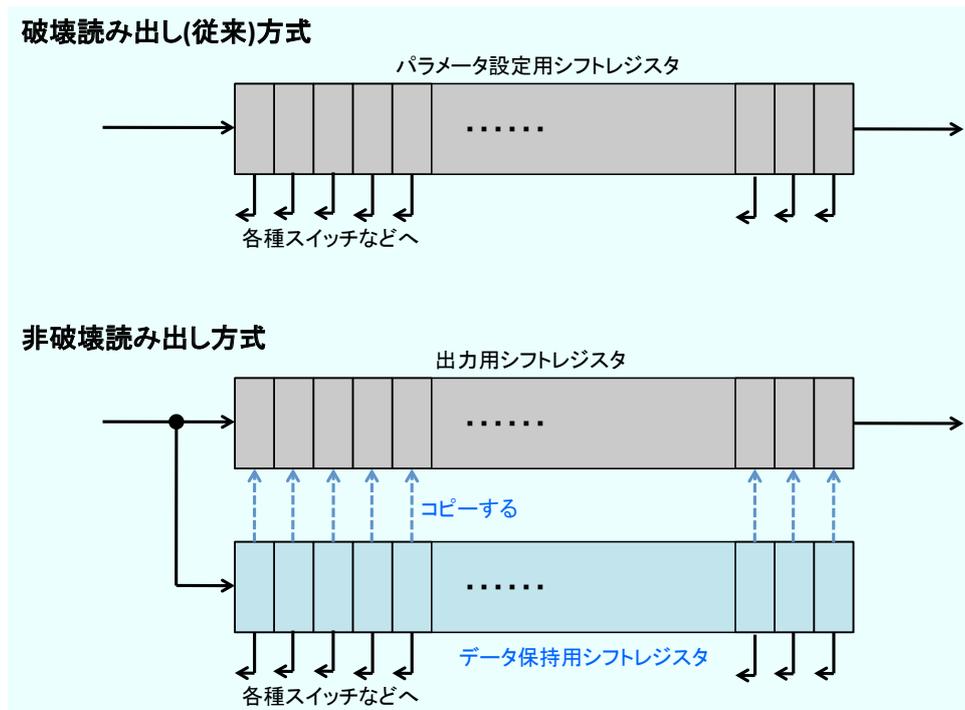


図 4.4: SA03 のコントロールレジスタ非破壊読み出し，書き込み用と読み込み用の 2本のレジスタを使用し非破壊読み出しを実現している

4.4 SA03 アナログ部動作検証

アナログ部の動作検証にはアナログ回路シミュレーターである Tanner 社の T-Spice™ を用いて行った。以下，動作検証結果を示す。

前置増幅器の増幅率とダイナミックレンジの確認

SA03 の前置増幅器は電荷有感型であるため，入力電荷に比例した信号が出力される。また，SA03 の前置増幅器は SA02 から変更点がないため，増幅率は SA02 と同程度になることが予想される。なお，増幅率は 4 段階に調節可能である。最も増幅率の高い設定 (gain0) を基準 (=1) として 1/2, 1/3, 1/4 となるように設計されている。本動作検証は SA03 の前置増幅器の増幅率が SA02 と同程度の値となり，かつ十分なダイナミックレンジを確保できる設計となっているか確認するために行った。

本動作検証はテストパルスをもつコンデンサを 0.1 pF のコンデンサを通して生成した擬似信号を前置増幅器に入力し，波形整形器を通した後に生成したアナログ信号の波高値から増幅率を見積もった。図 4.5(a) に HAPD に対して 1 光子検出信号相当のテストパ

ルスを入射した際に出力されるアナログ信号の4段階の出力波形を示す。図4.5(b)

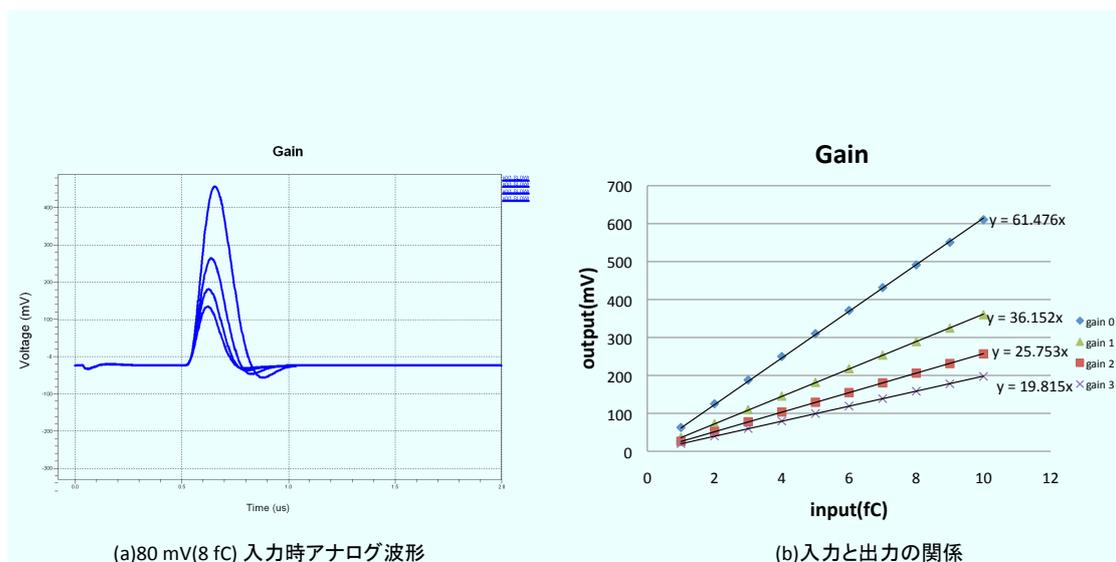


図 4.5: 前置増幅器のシミュレーションによる増幅率の評価

は擬似信号の入力とアナログ波形の波高値の関係をプロットした図である。最大増幅率 (gain0) が最小増幅率 (gain3) の4倍の値に対して低い値となっている。これはFETスイッチによる容量の切り替えでゲインを調節しているため、FETスイッチが浮遊容量となっているためである。しかし、極端な増幅率の低下は起こっておらず、機能上は問題ない。また、SA02と同様にHAPDに対して1光子相当信号入力時にダイナミックレンジが保たれていることも確認できた。よって、SA03の前置増幅器は要求性能を満たす設計であることを確認した。

波形整形器の Shaping time の確認

前述した通り、SA03は中性子損傷したHAPDからの読み出し時のノイズを最小限に抑えるため、波形整形器から出力されるアナログ波形の Shaping time²を $100 < \tau < 200$ [ns] の領域に調節できるよう設計した。この領域に Shaping time を設定できることを確認するため、動作検証を行った。このとき、HAPDからの1光子相当信号である80 mV、すなわち8 fC(= 50,000 e^-)の信号を入力した。図4.6に動作検証結果を示す。Shaping time はそれぞれ100,110,130,200 ns に設定することができた。したがってSA03はアナログ波形の Shaping time を $100 < \tau < 200$ [ns] に設定できる設計であることを確認した。

²波形の立ち上がりからピークまでの時間を Shaping time として定義している

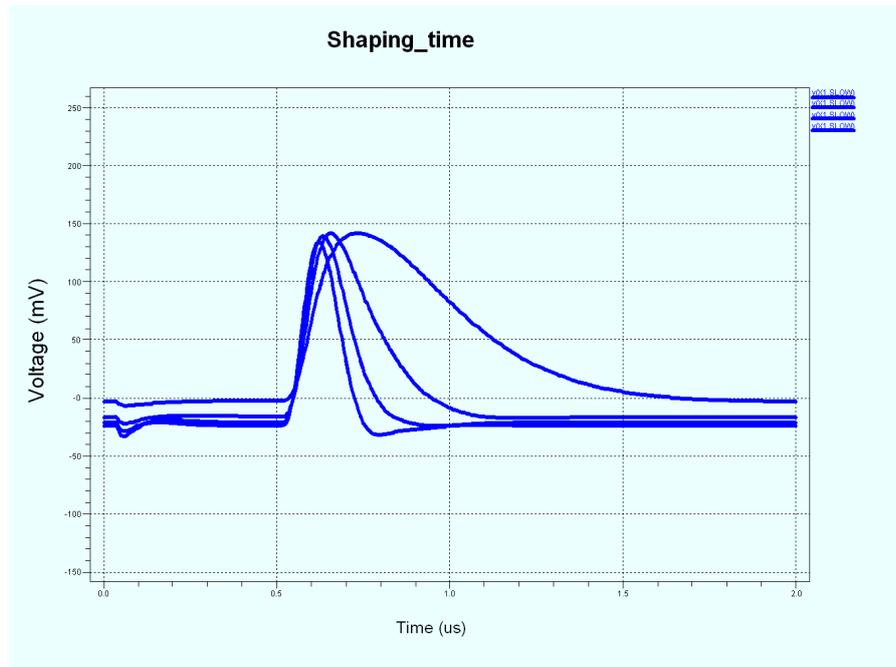


図 4.6: 波形整形器の Shaping time を 4 段階に調節して比較したアナログ波形。このとき、80mV(1 光子相当) の信号を入力している

オフセット調節機能の確認

前述したように SA シリーズは全チャンネルで閾値電圧 V_{TH} を共通にする方式を採用した。そのため、全チャンネルで適切に 1 光子判別を行うためには全チャンネルのオフセット調節を行う。

SA03ではオフセットを粗調節、微調節で16段階で設定を行うように設計した。したがって、計256段階のオフセット調節機能が可能である。そこで、オフセット調節機能が正常に動作することを確認するため、動作検証を行った。本動作検証では80 mVのテストパルスを入力し、その入力波形のベース電圧をオフセットと定義した。

図 4.7(a) はオフセット粗調節した際の波形である。このようにオフセットを16段階に粗調節により設定し、得たアナログ波形のオフセットをプロットしたグラフが図 4.7(b) である。シミュレーションから40 mV 毎にオフセット調節できることを確認した。

同様にオフセット微調節の動作検証も行った。図 4.8(a) が微調節した際の波形であり、図 4.8(b) がそのオフセットをプロットしたグラフである。このように微調節は2.8 mV 毎にオフセット調節することができることを確認した。

微調節が2.8 mV 毎に16段階に調節できることからオフセット粗調節40 mV の調節範囲内にあるため、微調節が粗調節のレンジをカバーしているため、2.8 mV 毎

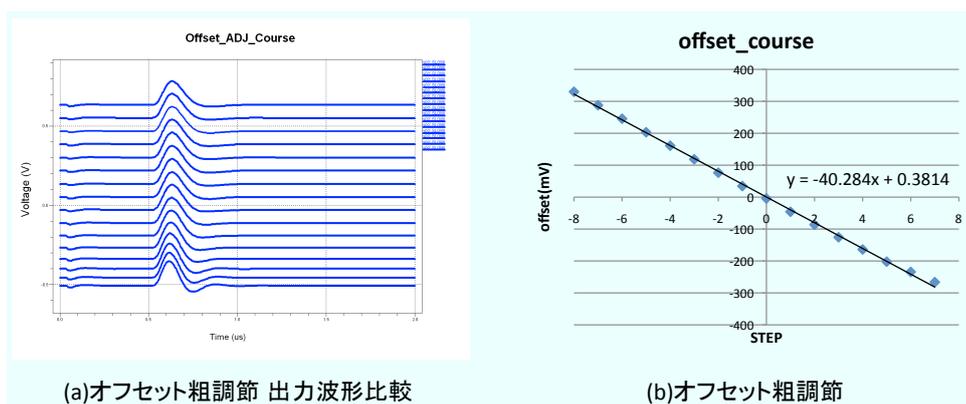


図 4.7: オフセット粗調節, 80 mV(1 光子相当の擬似信号)の擬似信号を入力している。

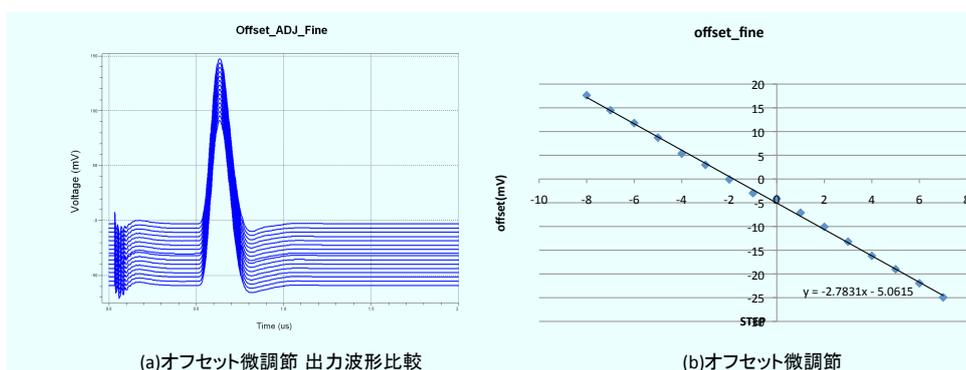


図 4.8: オフセット微調節のシミュレーション結果。16 段階に調節できていることが確認できる。このとき, 80 mV(1 光子相当の擬似信号)の擬似信号を入力している。

に調節できない範囲はない。また, 40 mV 毎に 16 段階の粗調節ができることから, SA03 は約 600mV の範囲を 2.8 mV 毎にオフセット調節可能であることを確認した。HAPD の S/N~7 である場合, ノイズ量は約 7,000 e^- である。このとき, 最大増幅率 (gain 0) に設定した場合, ノイズの波高値は約 70 mV である。ノイズの分布から 4σ の位置にオフセットを調節した場合, 280 mV のレンジで調節する必要がある。本動作検証の結果より, 粗調節を微調節を組み合わせることで約 600 mV の範囲でオフセット調節ができるため, 十分なオフセット調節の範囲を持っていると考えられることを確認した。

ノイズ量の評価

A-RICH で達成しなくてはならない S/N 比は 7 以上であり、HAPD の 1 光子入射時の出力信号は約 $50,000 e^-$ であるため、フロントエンドにおける SA03 のノイズ量は $7,000 e^-$ より十分小さい値であることが要求される。そこで、設計の段階においてノイズ量が十分低いことを確認するため、ノイズ量を見積もるためのシミュレーションを行った。

読み出し時のノイズは時期 4.1 で書き表した成分の他に $1/f$ 雑音の寄与、前置増幅器の帰還抵抗の寄与、検出器のバイアス抵抗の寄与などが挙げられる。本動作検証は検出器を設置している状態ではなく、SA03 単体での動作を検証しているため、検出器のバイアス抵抗や 4.1 の第 2 項の検出器のリーク電流を考慮しない。そのため、本検証は $1/f$ 雑音の寄与を考慮し、入力信号の周波数を変化させノイズ量の見積もりを行った。図 4.9 に Shaping time を最短値 (~ 100 ns) に設定したときのノイズ電圧と周波数の関係を示す。図 4.10 はノイズ電圧の周波数分布を積分した値を示している。そのため、高周波数領域まで積分を行ったノイズ電圧の値から実際に観測されるノイズ量を見積もることができる。

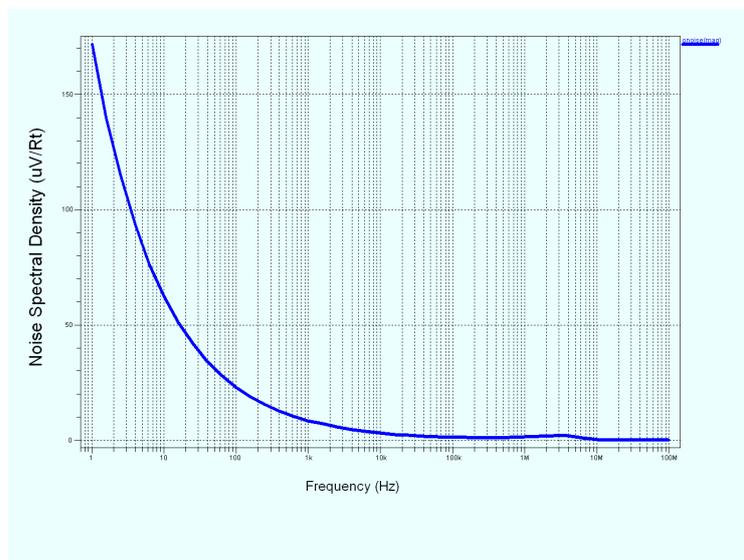


図 4.9: ノイズ電圧と周波数の関係

表 4.4 は Shaping time とノイズ量を比較した表である。これらの値は前置増幅率の増幅率を最小値 ($\text{gain3} \sim 20 \text{ mV/fC}$) とし、Shaping time をそれぞれ 4 段階に設定し、上に示したように周波数解析によって求めた値である。ノイズ量は式 (4.1) に従うと考えられ、本検証は読み出し用 ASIC 単体での評価であるため、式 (4.1) の第 1 項のみが効いてくる。そのため、表 4.4 の結果のようにシミュレーション上では Shaping

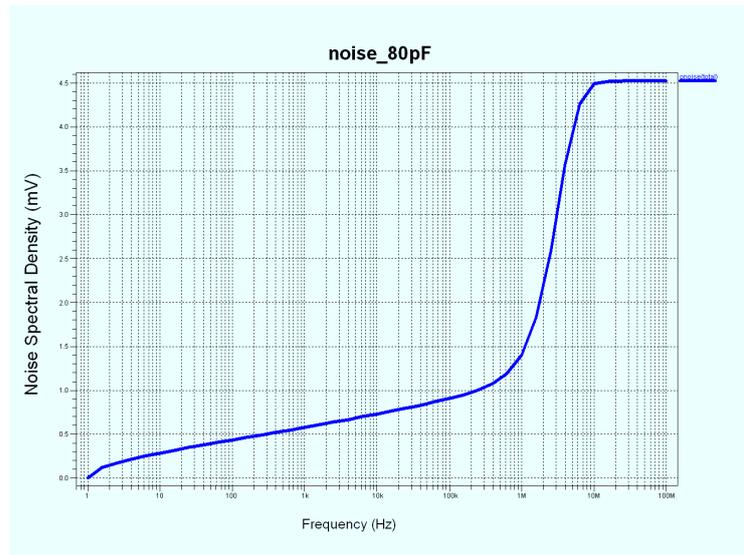


図 4.10: 図 4.9 のノイズ電圧を周波数で積分した値である。高周波数領域のノイズ電圧が観測されるノイズ量となる。

表 4.4: Shaping time とノイズ量

| Shaping time[ns] | noise[e ⁻] |
|------------------|------------------------|
| 100 | 1400 |
| 110 | 1300 |
| 130 | 1200 |
| 200 | 1100 |

time を短く設定した時にノイズ量が高い結果となった。4 段階の Shaping time 設定時において十分低いノイズ量であることが確認できた。

また、式 (4.1) によりノイズ量は検出器容量に比例することが予想される。ノイズ量と検出器容量の関係を理解するため、検出器容量を変化させ同様に周波数解析を行いノイズ量の見積もりを行った。ノイズ量は式 (4.1) の第 1 項に従い、検出器容量に比例して増加していることがわかる。なお、Bias 電圧を印加した際の HAPD の検出器容量は約 80 pF である。

以上より SA03 の予想されるノイズ量は 1,000~1,400 e^- であり、十分低い値であることを確認した。

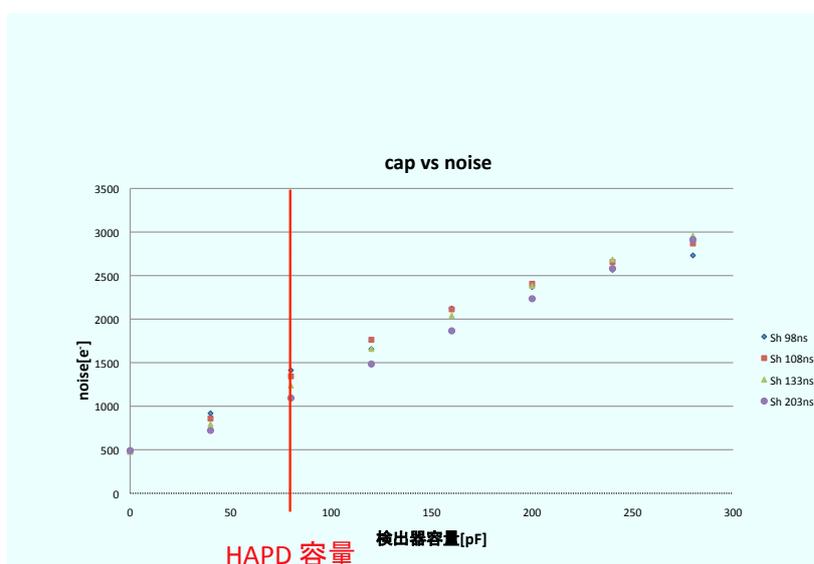


図 4.11: 各 Shaping time におけるノイズ量と検出器容量の関係

信号の短時間入力時の出力信号

Belle II 実験中には高い周波数での信号が入力されることも予想できるため、どの程度の短時間に信号が同時に入射された 2 つの信号を識別できるか確認を行った。図 4.12 はそれぞれ 50 ~ 200 ns まで 50 ns 毎に信号が同時入力された場合の波形である。200 ns 後に信号が入力された場合には 2 つのヒット信号が出力されている。よって、次の信号が入力されるまでに 200 ns 以上が経過すれば信号の識別が可能であることがわかる。したがって、SA03 は Shaping time を最小値 (100 ns) に設定した場合、5 MHz までの周波数までの信号に対応することができると考えられる。

アナログ部動作検証のまとめ

これらのアナログ部シミュレーションの結果から Shaping time を $100 < \tau < 200$ [ns] の範囲に設定することができた。また、その他の動作検証により、SA02 と性能がほぼ一致したことも確認できた。そのため、SA03 のアナログ部は設計上、要求性能を満たしていると言える表 4.5 にアナログ部動作検証結果をまとめる。

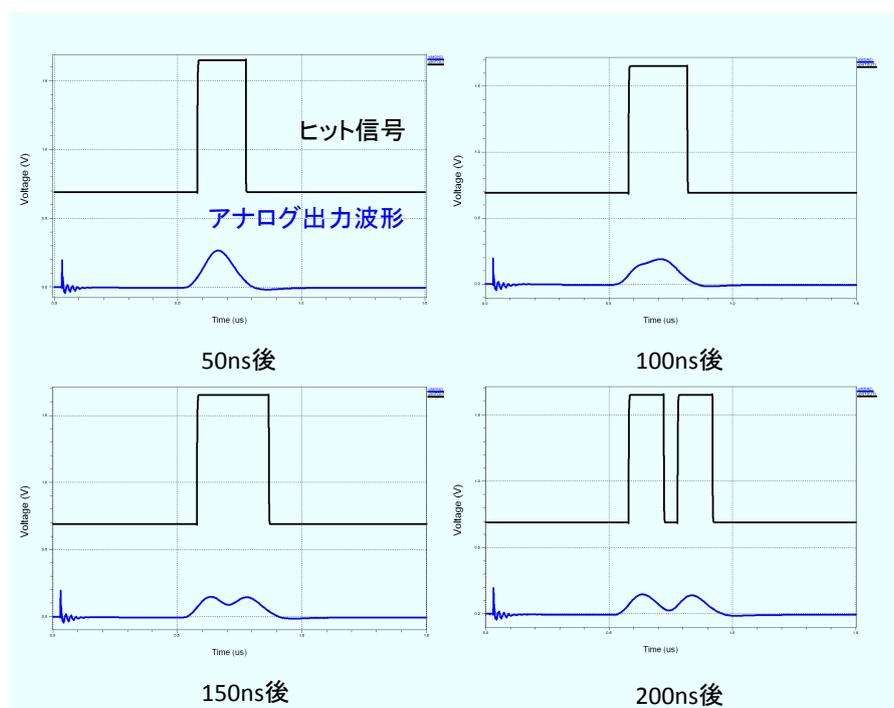


図 4.12: 短時間内に信号が同時入力された場合の出力波形

4.5 SA03 デジタル部動作検証

SA03 にパラメータを設定するための動作解説について記述する。本動作検証では SA03 のパラメータの非破壊読み出しができることを確認するために行った。

SA03 には全チャンネルに共通のパラメータを設定するための「CONTROL_LCR」(図 4.13), 各チャンネルに与えるパラメータを設定するための「CONTROL_CCR」(図 4.15) という 2 つのレジスタが備わっている。そこで, それぞれのレジスタでデジタル回路設計用論理シュミレータである iSim によるシミュレーションを行い, 動

表 4.5: SA03 アナログ部シミュレーション結果

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| 増幅率 | 20, 25, 36, 61 mV/fC |
| Shaping time | 100, 110, 130, 200 ns |
| 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 (80pF の検出器容量接着時) | 1,400 e ⁻ |

作の確認を行った。以下，iSim による非破壊読み出しの検証結果を示す。

グローバルパラメータ非破壊読み出しの検証

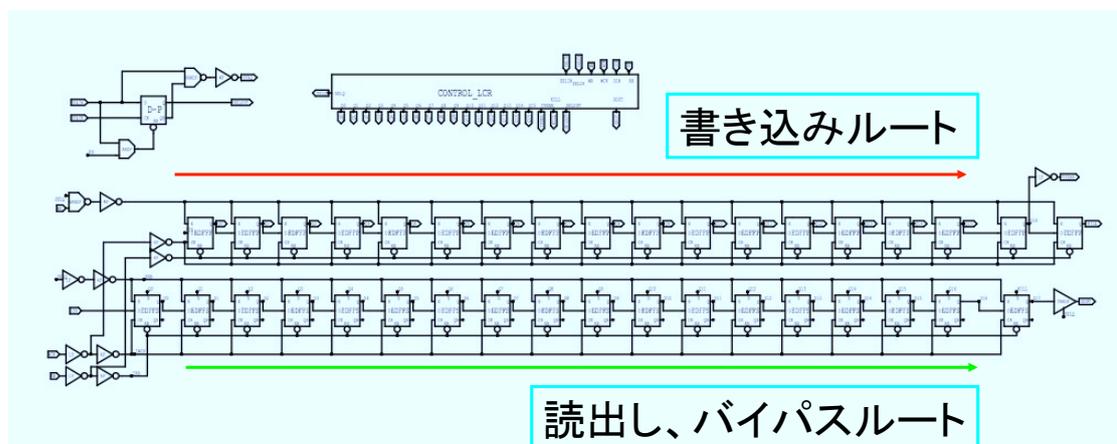


図 4.13: Control.LCR の回路図。上のレジスタが書き込み用，下のレジスタが読み出し用である

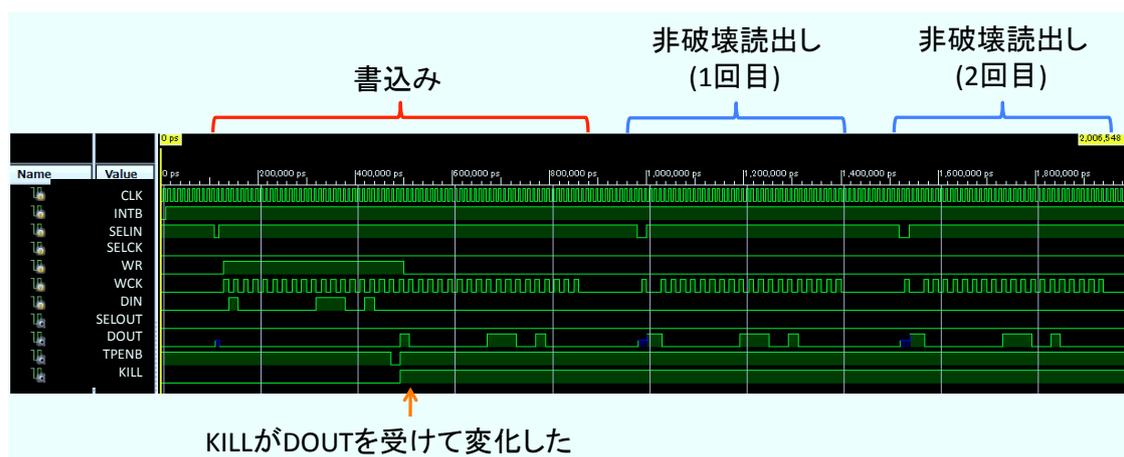


図 4.14: LCR のシミュレーション結果

図 4.14 ではまず書き込みを行っている。DIN にレジスタ出力 (KILL), Q8~Q6, Q3 にデータを送り書き込みを行った。書き込み後 WR を L にした後，DOUT から確認用の信号が出力され，入力と同じパターンであることが確認できる。また，Q17 は

チャンネル単位で出力を OFF にできる KILL 機能のレジスタであり，それに対応した信号が確認読出しの Q17 が立ち上がると KILL 信号も H になった。よって，制御回路も正しく動作していることが確認できた。

続いて非破壊読み出しの確認を 2 回行った。非破壊読み出しを行った結果，図 4.14 のように DIN の入力に対応したデータパターンが出力されていることを確認できた。また，TPENB，KILL には変化を起こさずに読み出しができていることもわかる。新たに書き込みを行わなければ何度も非破壊読み出しができることを確認するために再度非破壊読み出しを行なっているが，1 回目と同じ結果となっていることが確認できた。

よって「CONTROL_LCR」単体での非破壊読み出しの動作をシミュレーションにより確認することができた。

チャンネルパラメータの非破壊読み出しの検証

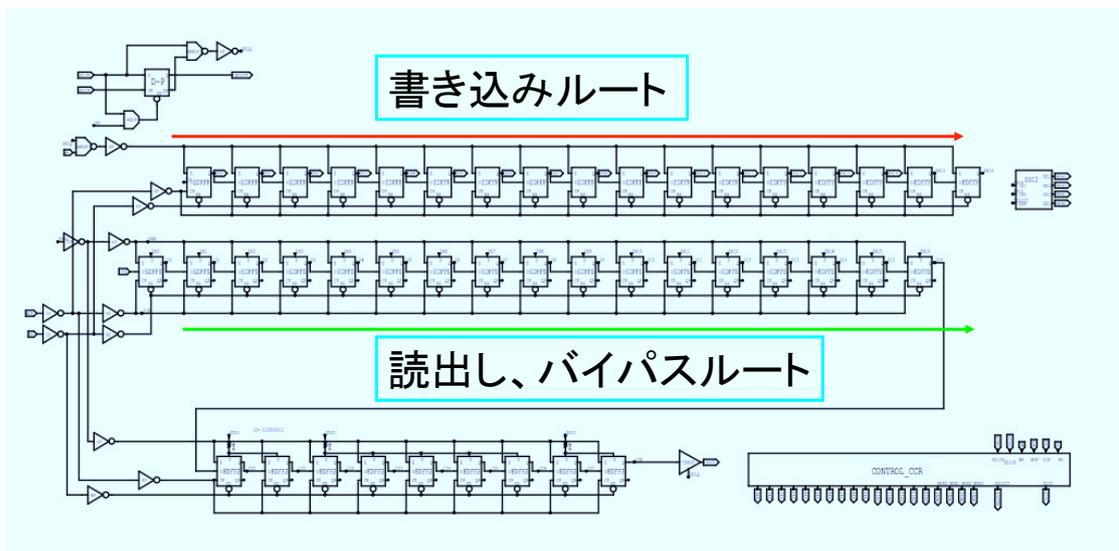


図 4.15: Control_CCR の回路図。上のレジスタが書き込み用，下のレジスタが読み出し用である

同様に「CONTROL_CCR」単体での非破壊読み出しも確認した。「CONTROL_LCR」と基本的には同じ構造である。上段に副線となるシフトレジスタが 17 段，下段の主線となるシフトレジスタには 26 段となっている。主線 26 段のうち後段の 9 段はチップ識別子として使用され固定値「11000011」を出力するため，書き込み用レジスタにはこの 9 段は必要なく上段は 16 段構成となっている。そのため，最初の 9bit は空

データを書き込んでいる。

以下 iSim によるシミュレーション結果を示す。図 4.16 では書き込み後 2 回非破壊

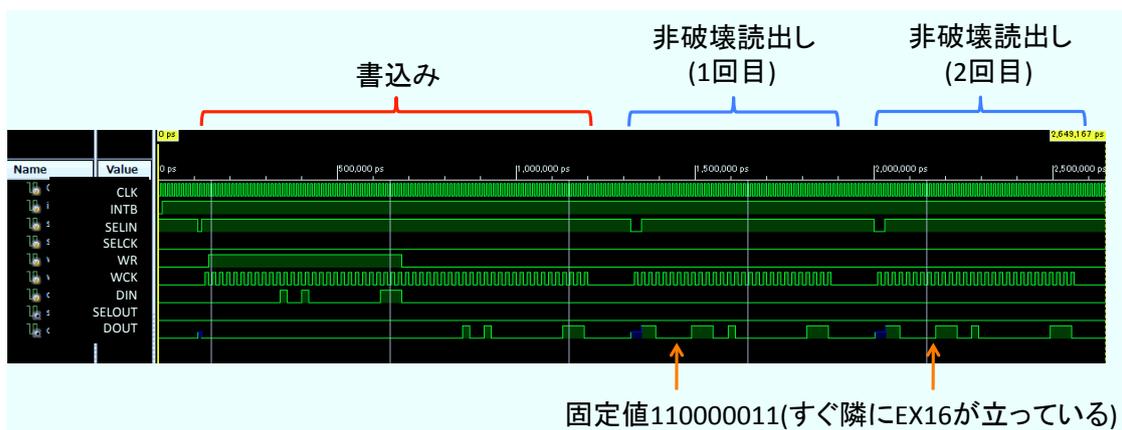


図 4.16: CCR のシミュレーション結果

読み出しを行なっている。書き込み時はまず最初の 9bit は入力しても無意味なので空にしておく。その後、EX16 に対応するデータから送ることになるが、ここでは EX16, EX13, EX2, EX0 を DIN に送った。書き込み後 WR を L にした後、DOUT から確認用の信号が出力され、入力と同じパターンであることが確認できた。

続いて非破壊読出しの確認であるが、入力したパターンに加え、固定値である 110000011 が最初に付加されている。したがって 2 回とも期待通りの出力となっている。よって、「CONTROL_CCR」単体での非破壊読み出しの動作をシミュレーションにより確認できた。

全体回路の検証

36チャンネル分接続した最終版回路での検証を行った。その動作解説結果を以下図 4.18 に示す。

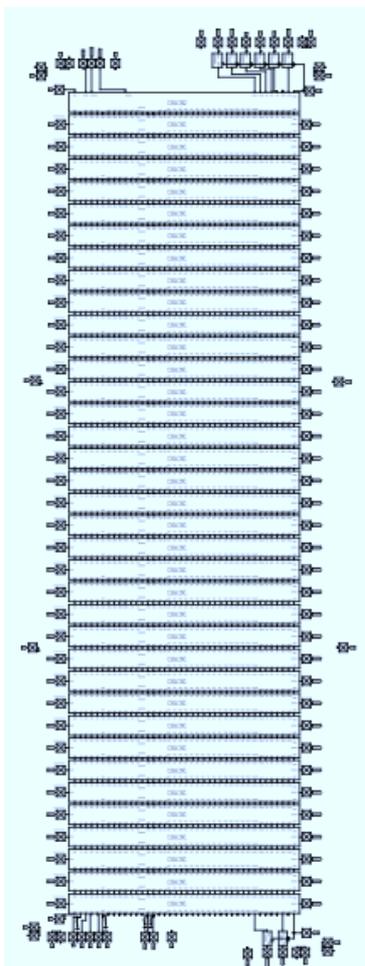


図 4.17: SA03 回路図

図 4.18 ではまず書込みを行っているが 1 回目が SELCK を 2 回送って ch1 への書込み, 2 回目がグローバル制御用の書込みである。そして, DIN としてはチャンネルパラメータはレジスタ出力 Q17(KILL), Q16(TPENB), Q8~Q6, Q3 に対応したデータを, グローバルパラメータは EX16, EX13, EX2, EX0 を送り書込みを行った。それぞれ書込み後に WR を L にした後, DOUT から確認用の信号が出力され, 入力と同じパターンであることが確認できた。

続いて非破壊読出しの確認をチャンネル制御, グローバル制御それぞれ 1 回ずつ

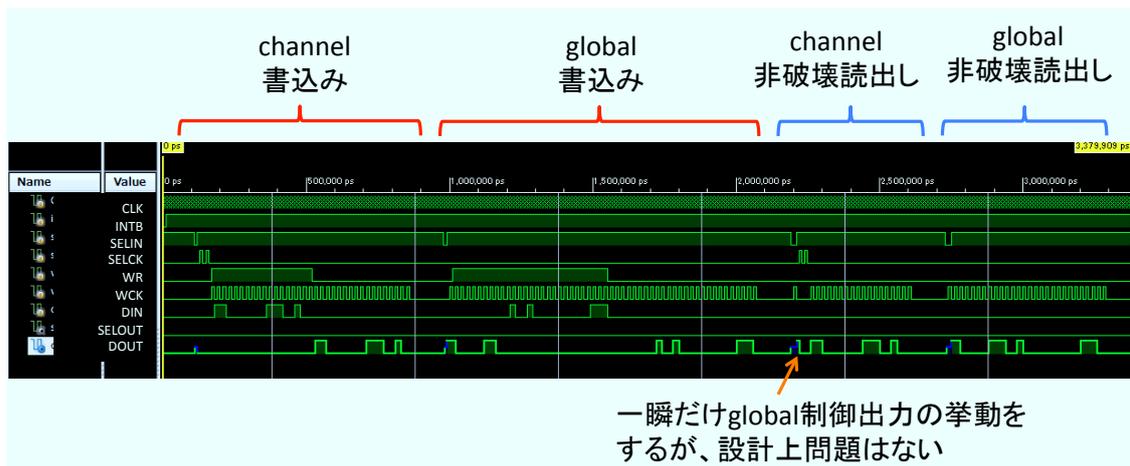


図 4.18: 全体回路でのシミュレーション結果

行っている。直前に書込みをした結果を読み出すのではなく、別の制御回路に書込みを行った後に正しく非破壊読出しができるかを確認するために、書込みと同じチャンネル、グローバルの順で読出しを行なった。その結果、チャンネル制御では ch1 を指定して読出しを行なったところ、SELCK を送っている間に DOUT より少し出力があった。これは、非破壊読出しでのチャンネルとグローバルの切り替えにおいて、同一の動作となる SELIN を L にしている間に WCK を 1 回送る動作のため、チャンネル制御の際にも初期はグローバル制御の動作をしてしまい、固定値の LSB からチャンネルに切り替える SELCK が入力されるまで出力されてしまうためである。しかし、動作としては予想通りであり機能上は問題ない。また、グローバル制御は固定値のあと入力したパターンを確認できた。以上をもって、CHAIN1, 2 同時に動作させた時も問題がなく動作したことを確認したため、全動作解説を完了とする。

4.6 SA03 シミュレーションのまとめ

以上のシミュレーションの結果からゲインやオフセット調節機能などは SA02 とほぼ同じ性能となり、非破壊読み出しによるパラメータ設定、中性子損傷した HAPD 読み出し時の最適値となる Shaping time に設定することが可能な設計に改良できたことを確認した。

次章では本章に記述したシミュレーション結果と実機による性能評価結果の比較を行う。

第5章 A-RICHのための 読み出し用ASICの実機評価

本章では Belle II A-RICH での使用を想定して開発した SA03, およびそのプロトタイプである SA02 の性能評価の結果について報告する。まず, SA シリーズのパッケージ, 仕様について記述し, 性能評価のセットアップについて記述し, その結果の検討を行う。

5.1 SA シリーズのパッケージ

SA シリーズは「QFP」と「LTCC」という2種類のパッケージで試作を行っている。QFP(Quad Flat Package)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, 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(Low Temperature Co-fired Ceramics)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, ボールグリッド実装により周囲にリードが張り出さず実装面積が小さくできる。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。[15]

図5.1にSA02のQFP, およびLTCCパッケージの写真を載せる。Belle II実験ではLTCCパッケージのSA03を使用する予定である。以下に記述する性能評価の結果は, LTCCパッケージ版のSA02, QFP版のSA03のものである。表5.1にSA02, SA03の基本仕様を示す。

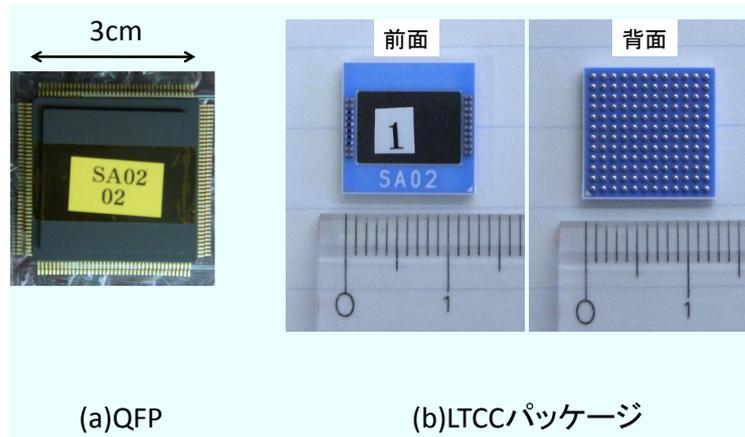


図 5.1: SA02 の QFP,LTCC パッケージ

表 5.1: SA02, SA03 の基本仕様

| | |
|----------|----------------------------------|
| プロセス | TSMC CMOS 0.35 μ m |
| PolySi 層 | 2 層 |
| Metal 層 | 3 層 |
| 電源電圧 | ± 1.65 V |
| パッド数 | 128 |
| チャンネル数 | 36 |
| ベアチップサイズ | 6.5 \times 3.0 mm ² |
| 設計雑音レベル | 2,000 e ⁻ (@80 pF) |

5.2 性能評価のセットアップ

SA02, SA03 の性能評価は図 5.2 のようなセットアップで測定を行った。トリガー信号を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, Test Board 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 5.3 の Test Board の右端上のフラットケーブル端子に SA02(SA03) 用の電源アナログ電源 (± 1.65 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 V) が供給される。下の端子 (データ出力) 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

システムである LVDS とした。

また、Test board 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。図 5.3 にその写真を示す。¹本セットアップを用いて SA02, SA03 の測定を行った。

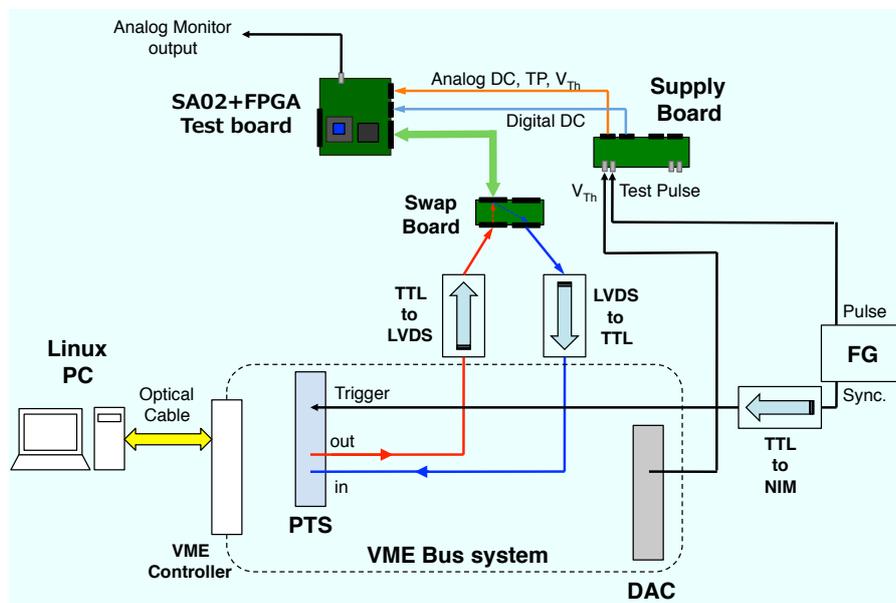


図 5.2: SA02,SA03 性能評価のセットアップ

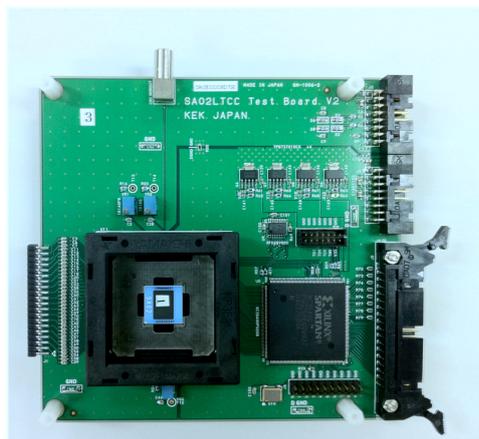


図 5.3: SA02 LTCC package の測定に使用したテストボード

¹図 5.3 は LTCC パッケージ用のソケットが搭載された Test board である。QFP 用の Test Board は QFP のソケットが搭載されている。

5.3 性能評価項目

SA02, SA03 の性能評価項目を以下に記述する。

- 増幅率の測定
- オフセット調節
- ノイズレベル
- 不良チャンネルの確認
- パラメータ非破壊読み出しの検査 (SA03 のみ)

SA02, SA03 におけるこれらの性能の比較, および SA03 に関しては増幅率, オフセット調節, ノイズレベルはシミュレーションで動作検証を行っているため, その比較を行った。

5.4 性能評価方法

SA シリーズの出力は 2 値のデジタル信号であるため, 直接アナログ波形の波高値などの情報を得る事はできない。そこで我々は「Threhsold scan」という方法を用いて SA02, SA03 の測定を行った。その測定方法を以下に記述する。

- 閾値電圧 V_{th} を初期値 th_0 に設定
- 各 V_{th} で一定回数 ($nevent$) トリガーを入力し, アナログ出力信号が $nevent$ 回中, 何 $event$ が V_{th} を超えたか測定する
- V_{th} を dth 刻みで更新していく

th_0 , $nevent$, dth は測定する際に設定する。

次に解析方法について解説する。図 5.4 にその図を概念図を示す。図 5.4(左) 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, アナログ波形の ADC 分布は図 5.4(右) のようになる。閾値電圧 V_{th} を上記の様な方法である一定電圧 dth 毎に変化させていくと図 5.4(中央) のような分布になることが予想される。Threshold scan により得られるアナログ信号の波高分布は理想的には矩形波のようになると考えられるが, 実際にはノイズの影響のために Gauss 分布で波高値にばらつきが生じ, 図 5.4(中央) のような波形分布として観測される。このとき, V_{th} の低い縁がアナログ波形のオフセット電圧に, 高い方の縁がパルスの波高値に対応する。したがって, 2 つの縁の差を求めることでアナログ信号の波高値を求めることができる。これらの 2 つの縁は Gauss の相補誤差関数 $erf(x)$ で fitting することによって求めることができる。

相補誤差関数 $erfc(x)$ のパラメータが信号のピーク位置 (mean 値), ノイズ (標準偏差) となる。

$$erfc(x) = 1 - erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (5.1)$$

式 (5.1) は近似させる縁によって以下のように使い分ける。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}erfc\left(\frac{V_{th} - \mu_{sig}}{2\sigma}\right) \\ & - \frac{1}{2}erfc\left(\frac{V_{th} + \mu_{sig}}{2\sigma}\right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

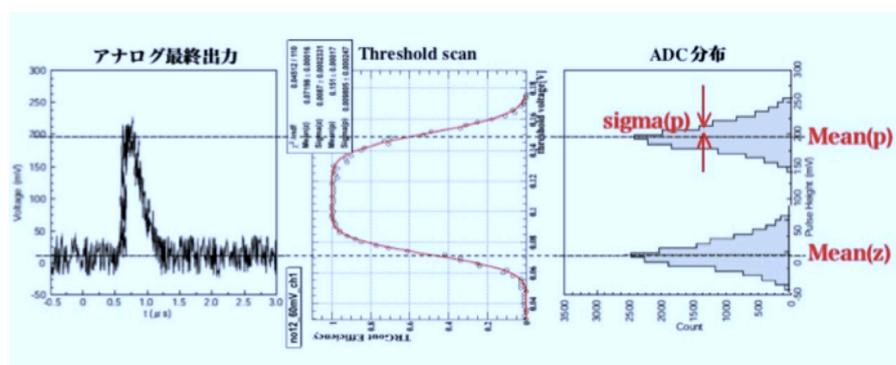


図 5.4: Threshold scan の概念図。テストパルスなど信号を入力した実際に出力されるアナログ波形 (左), Threshold scan によって得られる分布 (中央), アナログ波形の波高分布

また, SA02(SA03) に信号を入力していない状態でのアナログ出力を Threshold scan によって測定することで, ノイズ電圧を求めることができる。この際に得られる波高分布は Gauss 分布に従うと考えられるため, Gauss 関数で Fitting し, 得られた σ をノイズ電圧と定義する。また, このとき得られるノイズ電圧の分布の中心値 μ をベース電圧, すなわちオフセットと定義する。

5.5 SA02 の性能評価

増幅率の測定

SA シリーズの前置増幅器は電荷有感型であるため, 入力電荷量とアナログ波形の波高値の関係の傾きから増幅率を求めた。SA02 の増幅率は最大ゲイン (gain0) 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 ($8 \text{ fC} \sim 50,000 e^-$) 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。

測定回路は図 5.5 のように入力信号に 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を入力を変化させていき、Threshold scan によりアナログ波形の波高値を求め、その入力電荷と波高値の関係から SA02 の増幅率を求めた。

その結果を図 5.6 に示す。増幅率は $19, 22, 32, 61 \text{ fC/mV}$ となり、設計通りの値にゲインを設定することができることを確認できた。また、1 光子信号相当入力時にダイナミックレンジを確保できていることも確認できた。本結果から SA02 の前置増幅器としての機能が要求性能を満たすことを確認した。

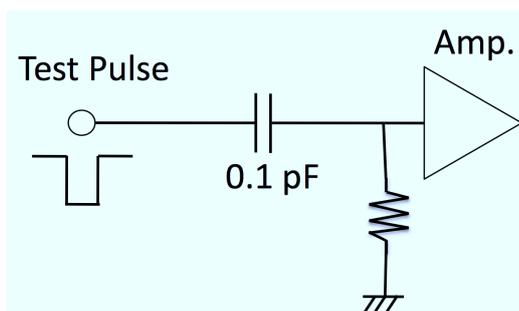


図 5.5: テストパルスの増幅回路は 0.1 pF の容量を通してしている

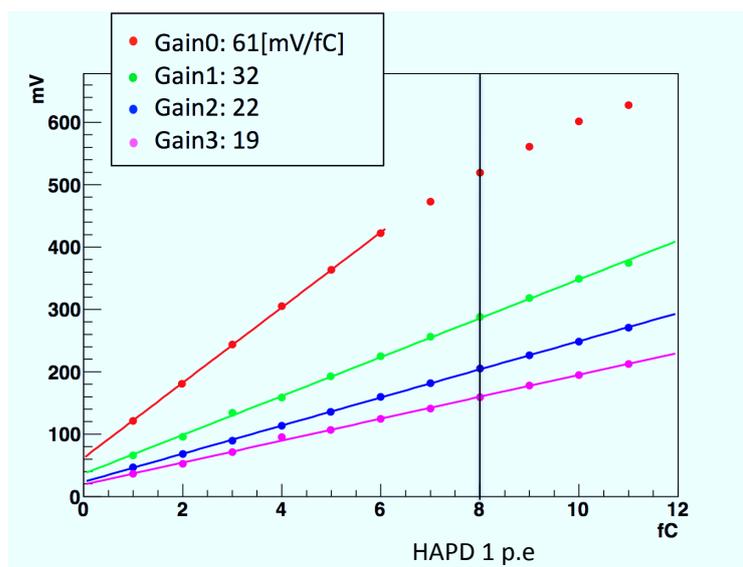


図 5.6: SA02 のゲイン

オフセット調節

SA02ではオフセットを粗調節，微調節共にそれぞれ16段階に，計256段階に調整することができるよう設計された。本測定は粗調節，微調節共にオフセットを適切に調節できること，オフセット調節範囲，および調節精度を求めるために行った。測定の際は信号を入力せず，Threshold scanを行い，各オフセットを求めた。

その結果を図5.7に示す。それぞれ，粗調節60.7 mV/STEP，微調節6.0 mV/STEP値に調節でき，900 mVの範囲を6 mVの精度で調節可能であることを確認した。これはA-RICHに使用するために十分な範囲，および精度である。よって，SA02のオフセット調節機能が要求性能を満たしていることを確認した。

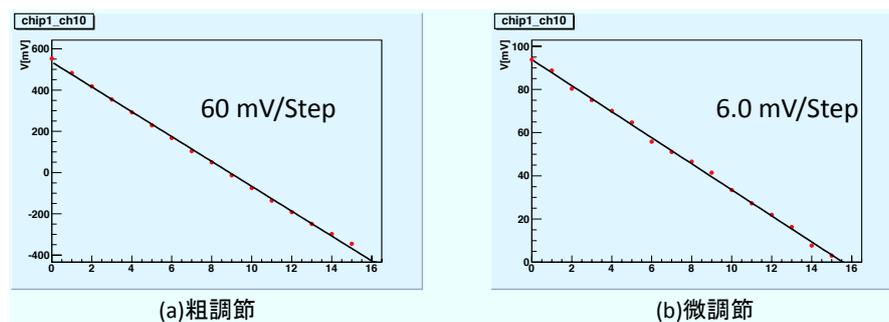


図 5.7: オフセット粗調節，微調節の機能

ノイズレベル

A-RICHの達成しなくてはならない $S/N \sim 7$ 以上であるため，SA02単体での S/N は更に高い値でなければならない。HAPDからの信号は $50,000e^-$ であることから，SA02単体でのノイズ量は $5,000e^-$ 以下である必要があると考えられる。なお，SA02のノイズ量は $2,000e^-$ 程度になるよう設計されている。

本測定はテストパルスを入力していない状態でThreshold scanを行うことによりノイズ電圧を求め，その電圧値を増幅率から電子数に換算し，ノイズ量を求めた。また，本測定ではテストボードの信号入力ピンに80pF(HAPDにバイアス電圧を印加した時の容量相当)の擬似容量を付けて行った。なお，SA02のゲインは最小値(gain3)19 mV/fCに設定し測定を行った。

図5.8に各チャンネルのノイズ量 $[e^-]$ の結果を示す。このようにノイズ量は $3,500e^-$ 程度となった。設計値よりノイズ量が多く観測されたことは，SA02を固定するためのソケットによりノイズが増加したことが原因であると考えられる。読み出しに使用する際は基板にボンディングしているため，SA02単体でのノイズ量は $2,000e^-$

程度であると予想される。したがって、ノイズ量は十分低い値であると言える。なお、ノイズ量が約 $0 e^-$ になっているチャンネルは次節に詳しく記述するデッドチャンネルである。

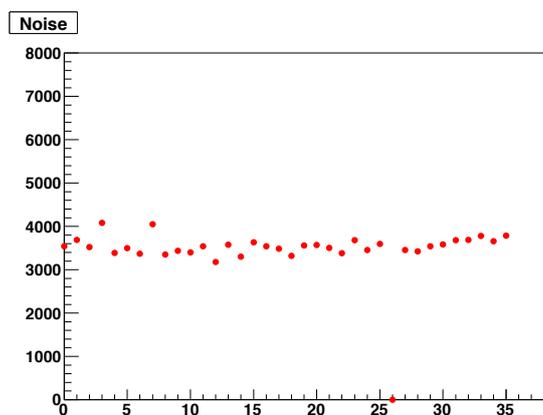


図 5.8: SA02 のノイズレベル

また、擬似容量を 220 pF まで変化させていき、増幅器の容量と全チャンネルのノイズ量の平均値の関係を調べた。その結果を図 5.9 に示す。読み出し時の等価雑音電子数は擬似容量に比例していることがわかる。また、ここで求めた比例係数 A から Shaping time の最適値が $100 < \tau < 200$ [ns] を求めることができる。

以上の測定から SA02 のノイズ量は十分低い値となり、要求性能を満たすことを確認した。

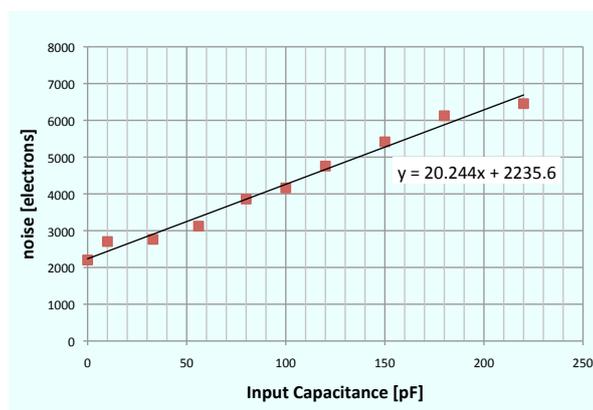


図 5.9: SA02 擬似容量の capacitor とノイズ量の関係

不良チャンネルの確認

SA02の不良チャンネルについて調査した。本測定は80mVの波高値のテストパルスをSA02に入力し、Threshold scanの結果とオシロスコープの出力波形を全チャンネルに渡り目視することで行った。不良チャンネルとして、図5.10(a)のように信号がほとんど出力されないチャンネル、および図5.10(b)のように出力される信号の動作が不安定なチャンネルが見られた。それぞれDead channel, Unstable channelと定義する。

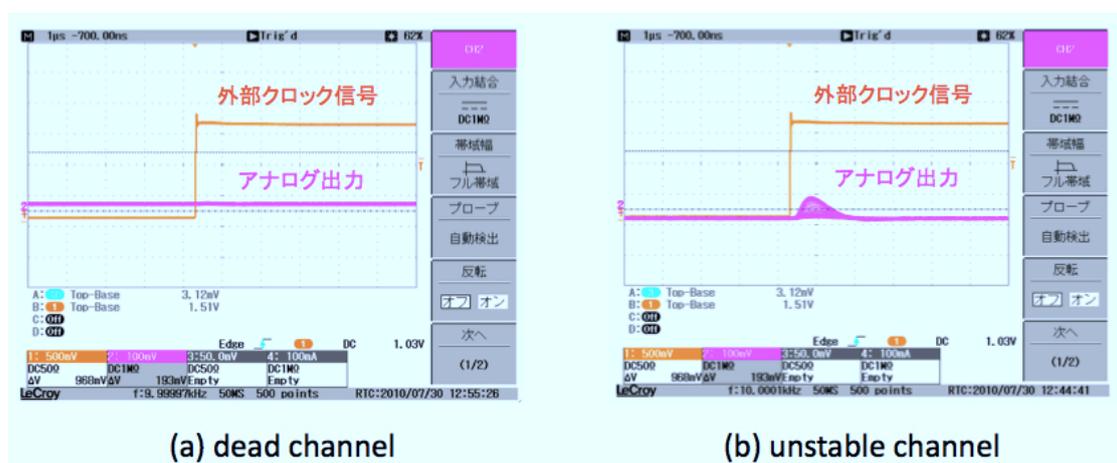


図 5.10: SA02 不良チャンネル。(a)は信号が全く出力されておらず、(b)は出力が不安定である

これらのチャンネルにより、S/Nの低下を起こしてしまうと考えられる。しかし、これらの不良チャンネルは36チャンネルのうち、0~2チャンネル程度と少ないため、データ読み出し時には加重平均などで補正を行うことで、S/Nの低下を防ぐことができると思われる。

SA02 性能評価のまとめ

このようにSA02はそれぞれの測定で期待通りの性能を示した。これらの測定からSA02がA-RICHに使用するための要求性能を満たしていることを確認した。以下、SA03の性能評価の結果について記述する。

5.6 SA03の性能評価

性能評価はQFP版のSA03を用いて性能評価を行った。図5.11にその写真を示す。SA03はBelle II検出器におけるA-RICHで使用することを想定して開発を行っているASICである。

前版であるSA02からはShaping time, およびパラメータの非破壊読み出し機能の改良を行った。Shaping time以外のパラメータの変更は行なっていないため, SA02と各測定において同程度の値になることが予想される。

なお, SA02の性能評価と同じセットアップで測定を行った。

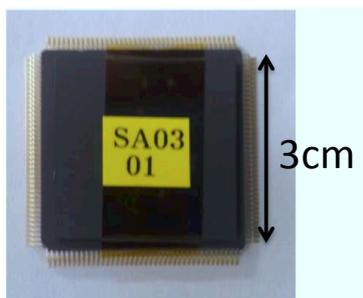


図 5.11: SA03QFP パッケージ

5.7 パラメータ非破壊読み出しの検査

SA02までは各種パラメータ設定はグローバルパラメータ, チャンネルパラメータ共に1本のレジスタに各値を記録することによって行なっていた。SA03ではそれぞれに書き込み用レジスタとデータ保持用の2本レジスタを用意することで非破壊読み出しを行う。以下, SA03で非破壊読み出しの検証結果を示す。

図5.12はグローバルパラメータの非破壊読み出しの動作検証結果である。26回のWCK立ち上がる際に書き込み時と同じ値が出力されている。このように書き込みした値と同じ値を読み出すことができた。本結果はシミュレーション結果と一致している。よってグローバルパラメータの非破壊読み出しができていることを確認した。図5.13はチャンネルパラメータの動作検証結果である。読み出し時, SELINが2度立ち上がっているがこれは読み出すチャンネルを指定しているためである。18回のWCK立ち上がりで書き込みと同じ値を読み出すことが出来た。よって, チャンネルパラメータの非破壊読み出しも正常に動作することも確認できた。

以上からSA03のパラメータの設定, および非破壊読み出しを正常に行うことができることを確認した。



図 5.12: グローバルパラメーターの検証結果

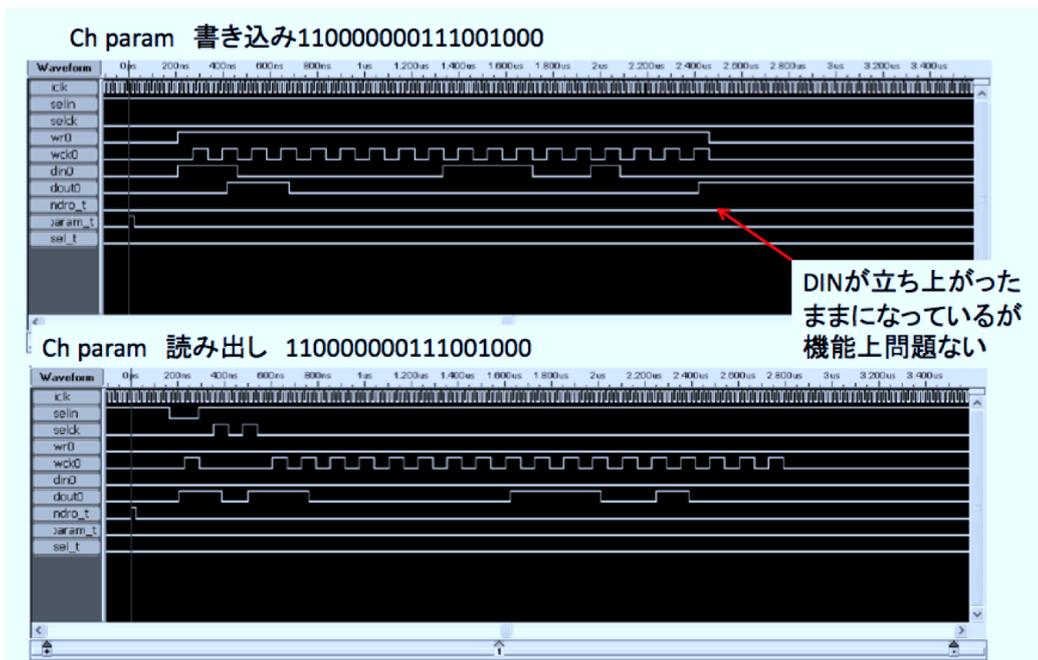


図 5.13: チャンネルパラメータの検証結果

増幅率の測定

SA02と同様に増幅率は gain 0 ~ 3 まで 1 : 1/2 : 1/3 : 1/4 になるように設定でき、その設計値は 61, 36, 25, 20 mV/fC である。増幅率が設計値と一致し、SA02と同様に十分なダイナミックレンジを確保していることを確認するため、増幅率の測定を行った。

測定はテストパルスを入力を 20 mV から 200mV まで 20 mV 毎に変えていき、SA02の増幅率の測定と同様に Threshold scan によってアナログ出力波形の波高値を求め、その入力電荷量と波高値の関係を求めることで増幅率の測定を行った。図 5.14 にその結果を示す。

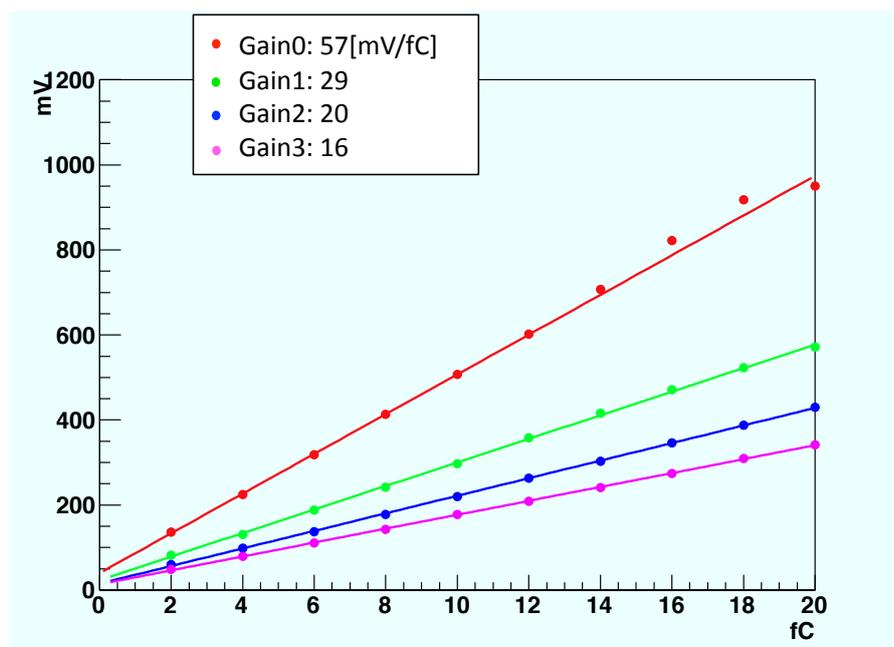


図 5.14: SA03 のゲイン

SA03の増幅率は図 5.14 のように 57, 29, 20, 16 mV/fC となった。シミュレーション値、および SA02 の増幅率と比較して、ほぼ同程度の値となっていることがわかる。また、十分なダイナミックレンジを持っていることも確認できた。したがって、SA03 の増幅機能は要求性能を満足している。

Shaping time の測定

Belle II 実験 10 年分の中性子損傷した HAPD からの信号読み出し時の Shaping time の最適値となることが予想される (100 ~ 200 ns) の範囲に設定できることを確認す

るため、測定を行った。また、SA03の Shaping time は4段階に設定することができ、設計値はそれぞれ 100, 110, 130, 200 ns である。

Shaping time は波高値から求めることができる量ではないため、Threshold scan を用いず、1 光子相当信号のテストパルス (80 fC) を入力した際に出力されるアナログ波形をオシロスコープでモニターし、測定した。なお、Shaping time の定義はアナログ波形の立ち上がりからピークまでの時間と定義している。

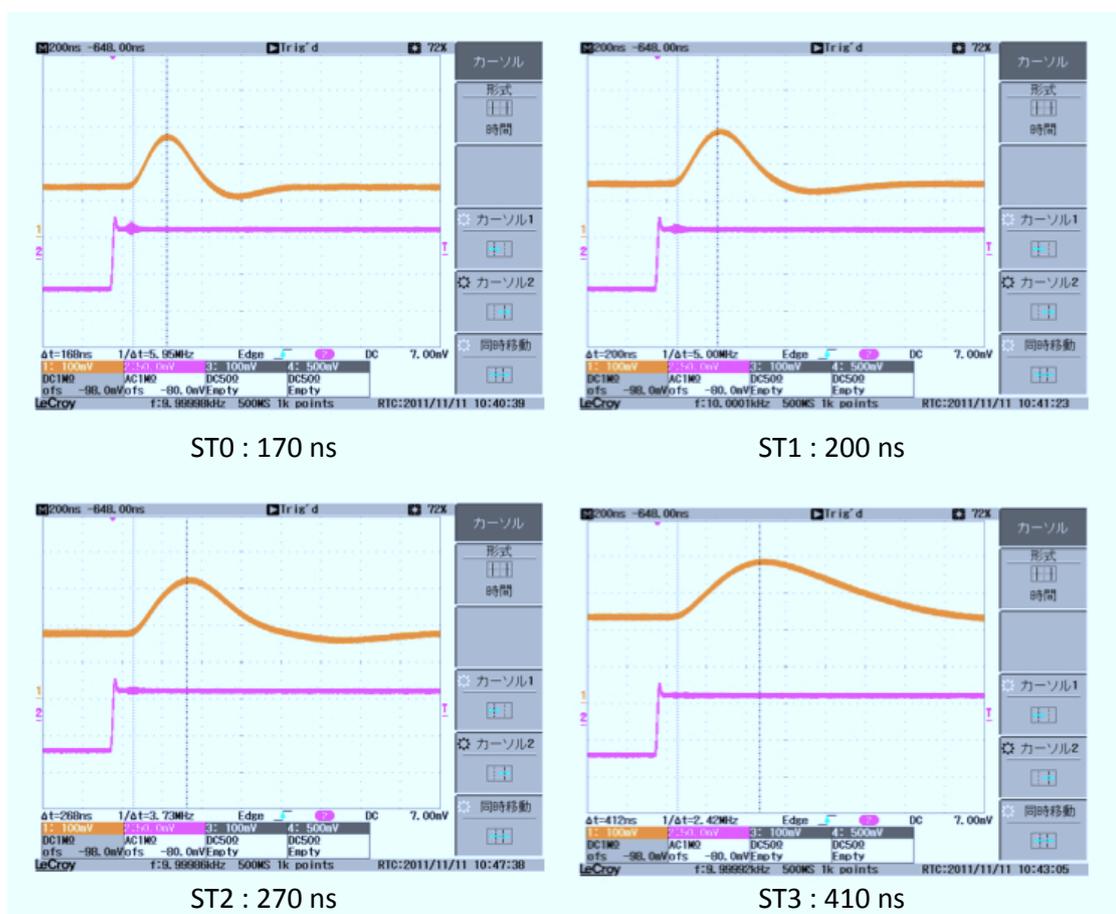


図 5.15: SA03 の Shaping time

図 5.15 に 4 段階に Shaping time を設定した際のアナログ波形を示す。このように実機の SA03 では 170, 200, 270, 410 ns という結果になった。設計値よりも長い値となったが、最適値である 100 ~ 200 ns の範囲に調整できることを確認することができたため、要求性能を満たしていると考えられる。

オフセット調節機能の評価

SA02と同様に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。粗調節で40 mV/STEP，微調節で2.8 mV/STEP 毎にオフセット調節が可能になるよう設計された。測定は Threshold scan により行った。

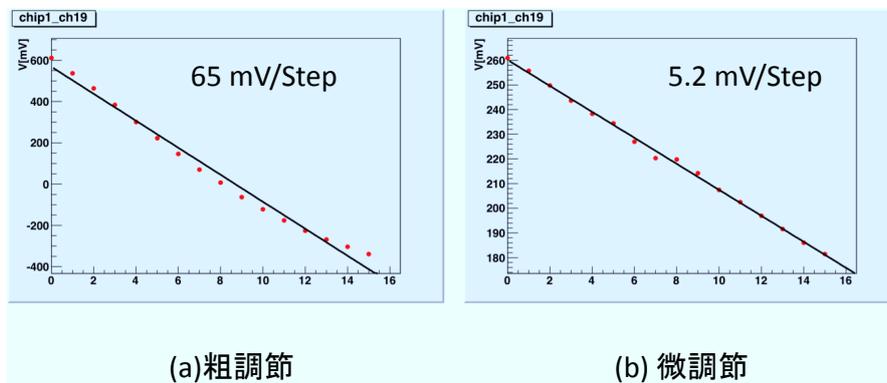


図 5.16: offset 粗調節，微調節の機能

図 5.16 にその測定結果を示す。このように粗調節で 65 mV/STEP，微調節で 5.2 mV/STEP に調節可能であることを確認した。粗調節，微調節共に設計値より 1 STEP あたりの調節範囲が大きい結果となったが，オフセット調節の精度としては 5 mV 程度あれば十分である。また，微調節のレンジが粗調節の 1 STEP あたりの調節レンジをカバーしており，正常にオフセット調節が可能であることがわかる。よって SA03 はオフセット調節機能は要求性能を満たしていると考えられる。

ノイズレベルの評価

SA02と同様に，SA03 単体でのノイズ量は $5,000 e^-$ 以下である必要がある。また，SA03 のノイズ量は SA02 と同様に $2,000 e^-$ 以下になるよう設計されている。シミュレーションにおいて，80 pF(HAPD にバイアス電圧を印加した際の容量)の検出器容量が設置している際のノイズレベルは $1,400 e^-$ 程度である。本測定も 80 pF の擬似容量をテストボードに装着し，シミュレーションと同じ条件で測定を行った。

図 5.17 はその結果である。SA02 のノイズレベルと同様に $3,500 e^-$ 程度のノイズ量となった。シミュレーションの値と比較して高いのはテストボードに SA03 を固定するためのソケットによりノイズが増加しているためであると考えられる。

また，擬似容量を 220 pF まで変化させていき，増幅器の容量とノイズ量の関係を調べた。その結果を図 5.18 に示す。SA03 の信号処理に依存する定数 $A \sim 20$ に対し，SA03 では $A \sim 19$ という値になり，ほぼ同じ値となった。このため，Shaping time の

最適値はこの定数から求めたため、Shaping time の最適値が 100 ~ 200 ns であることを確認できた。

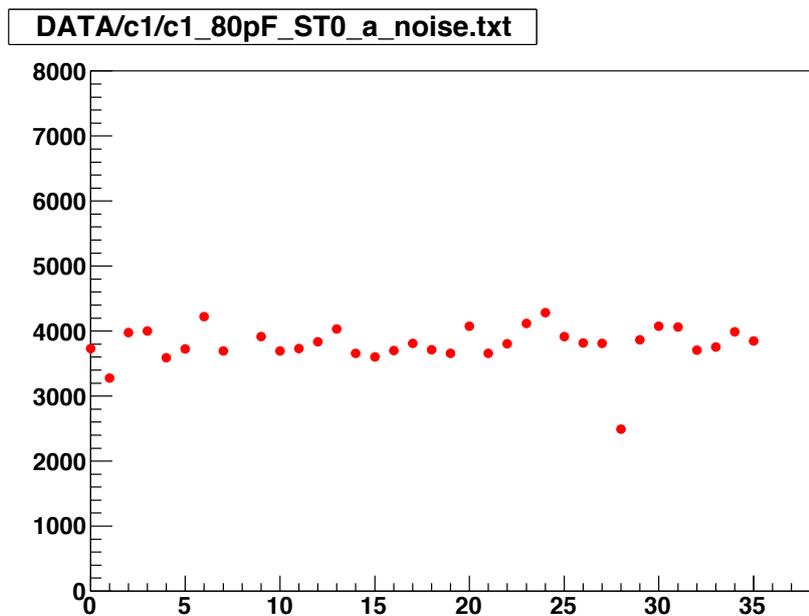


図 5.17: SA03 のノイズレベル

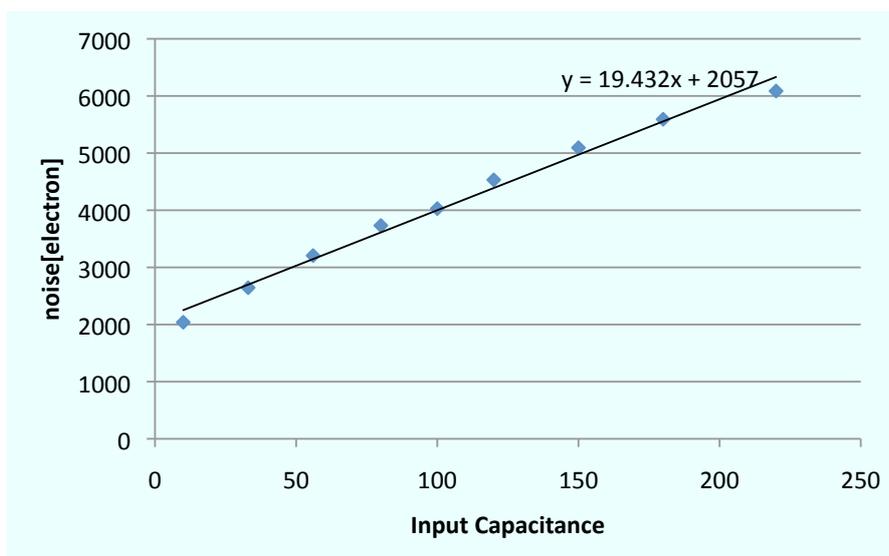


図 5.18: SA03 擬似容量の capacitor とノイズ量の関係

5.8 SA02, SA03 の性能評価のまとめ

Belle II 検出器における A-RICH の読み出し用 ASIC として使用するための ASIC SA シリーズを開発しており、その性能評価を行った。本測定により SA02 は A-RICH の読み出しシステムにおける要求性能を満たしていることを確認した。しかし、HAPD が Belle II 実験中に照射される中性子により損傷し、ショットノイズの増加による S/N の悪化が予想されるため、Shaping time を 100~200 ns に調節する機能が必要であることがわかったため、SA03 では Shaping time を 100, 110, 130, 200 ns に設定できるよう設計された。

また、SA02 まではパラメータの読み出しを破壊読み出し方式で行なっていたが、この方式ではパラメータを読み出し、再度同じパラメータを書き込むまでの間がデッドタイムとなってしまうため、SA03 では非破壊読み出し方式に改良した。

そして、試作した QFP の SA03 の性能評価を行った。本測定により、SA02 と同様に基本的な要求性能を満たしていること、非破壊読み出しの正常動作、Shaping time の最適値への調節機能を確認することができた。Shaping time は設計値より長い結果となったが、Belle II 実験における 10 年分の中性子照射を受けた HAPD の Shaping time の最適値である 100~200 ns の値の範囲に設定できるため、A-RICH に使用する上で問題ではないと考えられる。以上より、SA03 が Belle II 検出器における A-RICH の読み出し用 ASIC に求められる要求性能を満たしていることを確認した。

第6章 読み出し用 ASIC の放射線耐性の評価

Belle II 実験中に A-RICH には 10 年間で 10~100 kRad のガンマ線、および 10^{12} n/cm¹² の中性子が照射されることが予想される。読み出しシステムにおいて、これらの量の放射線耐性を持つことを確認するために SA02 に 10 年分のガンマ線、中性子の照射試験を行った。以下、その結果を報告する。FPGA や Belle II 実験において共通のデータ収集のための光ファイバーケーブルである Belle2Link においても現在放射線耐性の評価が進められている。

同様に A-RICH で使用する読み出し用 ASIC の放射線耐性も確認する必要があるため、中性子、ガンマ線を読み出し用 ASIC SA02 に照射し、前後でノイズ量の比較を行った。中性子照射は東京大学原子炉「弥生」にて SA シリーズの 2nd ver. である SA02 に照射を行い、ガンマ線照射は名古屋大学 ⁶⁰Co 照射室にて行った。以下、それぞれの照射試験における事前測定と事後測定の結果について報告する。

6.1 中性子照射試験

中性子照射試験は 2011 年 1 月に図 6.1(a) の東京大学原子炉「弥生」で行った。弥生の炉心燃料は高濃縮ウランで減速材を用いないため、熱中性子やガンマ線などの混入がほとんどない高純度の高速中性子を得られるのが最大の特徴である。なお、弥生は 2011 年 3 月に運転を終了している。中性子のエネルギースペクトルは図 6.1(b) のようになる。図 6.2 に弥生の構造図を示す。図 6.2 のように吊り下げ孔から炉心付近まで ASIC を吊り下げ、照射を行った。

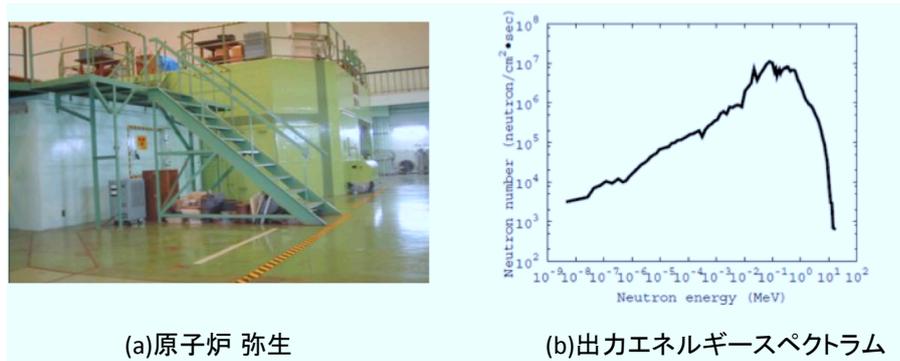


図 6.1: 中性子照射試験を行った東京大学原子炉弥生

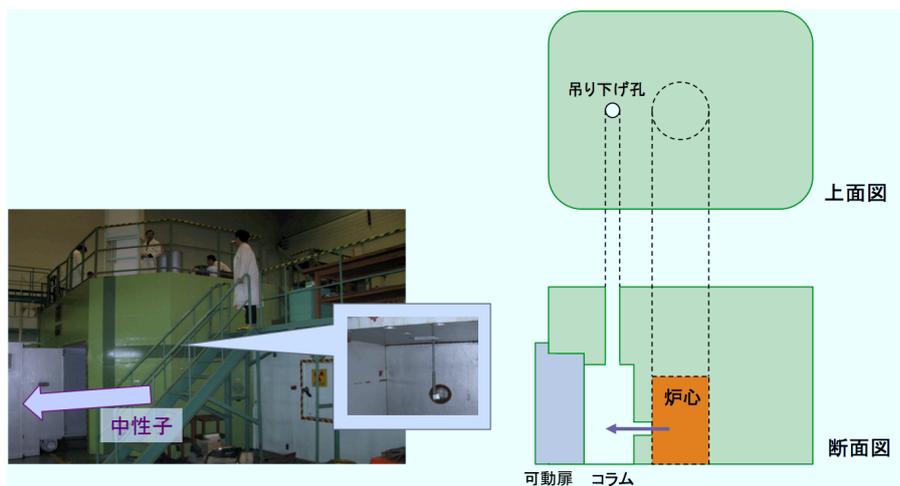


図 6.2: 中性子照射試験セットアップ

図 6.3 に照射前後での測定におけるノイズ量の結果を示す。本測定はテストパルスを入力していない状態で Threshold scan を行うことによりノイズ電圧を求め、その電圧値を増幅率から電子数に換算し、ノイズ量を求めた。また、本測定ではテストボードの信号入力ピンに 80pF(HAPD にバイアス電圧を印加した時の容量相当)の擬似容量を付けて行った。なお、SA02 のゲインは最小値 (gain3)19 mV/fC に設定し測定を行った。

これよりノイズ量が照射前後で変化していない事が確認できた。かつ、照射前後で不良チャンネルの増加も見られなかった。よって読み出し用 ASIC は Belle II 実験 10 年分の中性子耐性を持っていると考えられる。

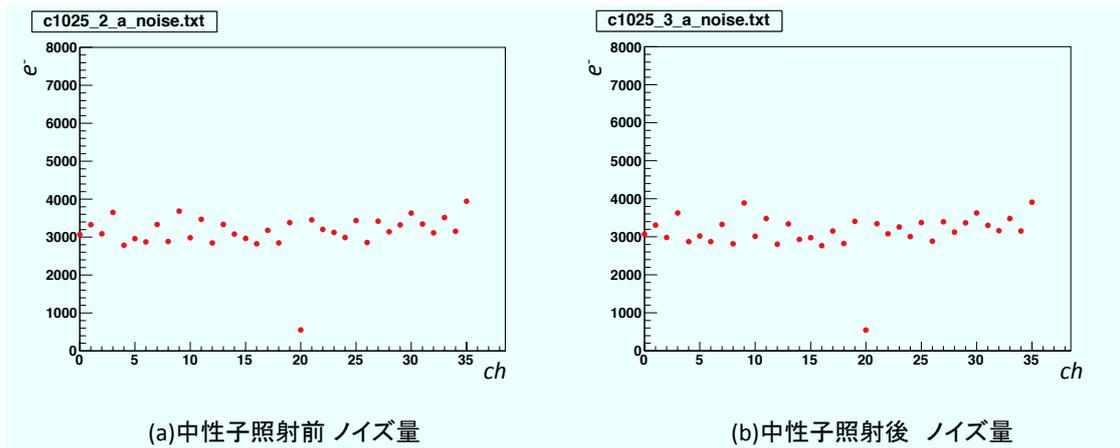


図 6.3: 中性子照射試験前後のノイズ量の比較

6.2 ガンマ線照射試験

中性子を照射した SA02 を用いて、ガンマ線の照射試験を 2011 年 10 月に図 6.4 の名古屋大学 ^{60}Co 照射室で行った。Belle II 10 年間で照射される線量に相当する 1,000 kRad 照射した。



図 6.4: ガンマ線照射試験セットアップ, 名古屋大学 ^{60}Co 照射室で行った

図 6.5 に照射前, 照射後のノイズ量の測定結果を示す。本測定も同様にテストパルスを入力していない状態で Threshold scan を行うことによりノイズ電圧を求め, その電圧値を増幅率から電子数に換算し, ノイズ量を求めた。また, 本測定ではテストボードの信号入力ピンに 80pF(HAPD にバイアス電圧を印加した時の容量相当)の

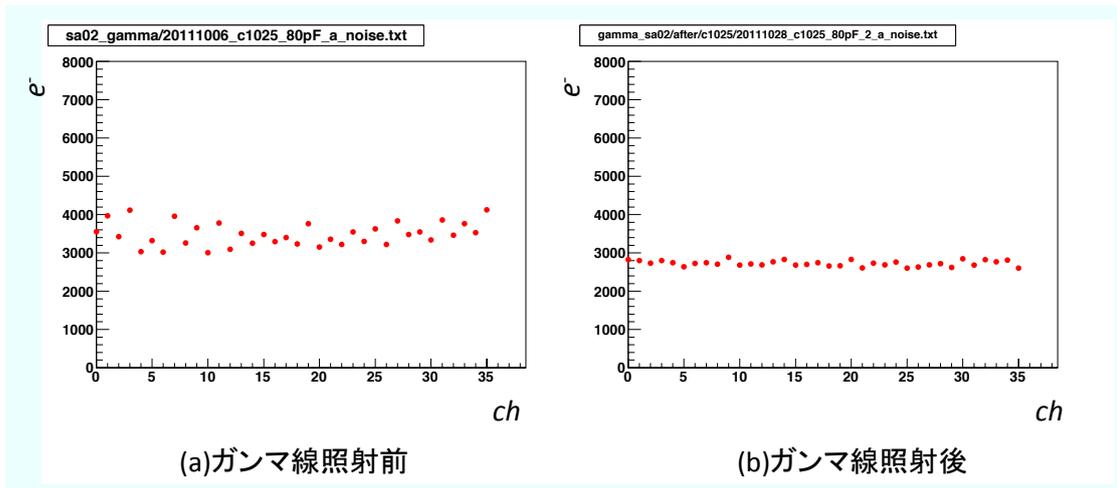


図 6.5: ガンマ線照射試験前後のノイズ量の比較

擬似容量を付けて行った。

このようにノイズ量が照射前後で変化していないことが確認できた。また、不良チャンネルの増加も見られなかった。よって読み出し用 ASIC SA02 のガンマ線耐性を確認した。

6.3 放射線耐性のまとめ

放射線照射前後で読み出し用 ASIC SA02 に Belle II 実験 10 年分に相当する中性子、ガンマ線を照射した結果、ノイズレベルの変化、および不良チャンネルの増加は見られなかった。したがって、読み出し用 ASIC である SA シリーズの Belle II 実験 10 年分の放射線耐性を確認することができた。

第7章 HAPD読み出し用ボードの性能評価

A-RICH の読み出し用エレクトロニクスはビーム軸方向に対して 50 mm 以内に設置する必要がある。そこで、A-RICH の読み出しシステムのフロントエンド部となる HAPD からの信号読み出しを行うためのボードの小型化を行った。本章では新たに開発した小型化した読み出し用ボードの性能評価の結果について記述する。

7.1 読み出し用ボードの開発

読み出し用ボードとは HAPD からの信号読み出しを行うためのボードである。2009 年のビームテストの際は図 7.1 の読み出し用ボードを用いた。このボードには SA シリーズの第 1 版である SA01 が搭載されていた。これを用いた 2009 年のビームテストでは K/π 識別が目標値 4σ に対して 6.7σ の精度での K/π 識別ができた。[20] そのため、本ボードは A-RICH における読み出しシステムとしての基本的な要求性能を満たしていると考えられる。

このとき使用したボードは図 7.1 のように奥行き約 15 cm の大きさを持っており、1 つの HAPD の信号処理のために 4 つのボードが必要であり、読み出しシステムの領域が大きくなってしまっていた。A-RICH のエレクトロニクスの設置空間はビーム軸方向に対して 50 mm であるため、Belle II 実験で使用するためにはボードの小型化が必要である。

SA01 は 1 チップあたり 12 チャンネルの信号処理機能を持っていたが、SA02 では 36 チャンネルの信号処理機能を行えるよう改良し、かつボードに搭載する ASIC のパッケージを QFP から LTCC パッケージに変更することで ASIC の小型化を行った。その SA02 を 1 つのボードに 4 つ搭載することで、1 つのボードで 1 つの HAPD の信号処理を行えるよう改良を行った。このように新たに開発した読み出し用ボードを図 7.2 に示す。図 7.3 に HAPD と読み出し用ボードを接続した写真を示す。

読み出し用ボードはメインボードとサブボードから成る。サブボードをメインボードの上に接続して使用する。小型化により読み出しボード全体の幅は約 3 cm となった。図 7.2(a) はメインボードの HAPD との接続面の写真である。この面に SA02 が搭載されている。また、図 7.2(b) はその裏側の面であるサブボードとの接続面の写真

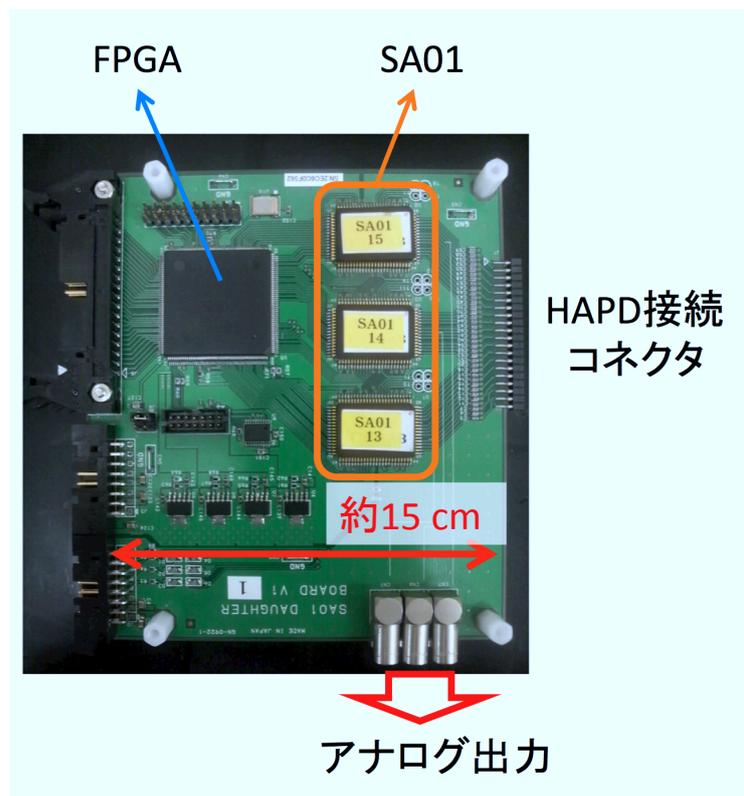


図 7.1: 2009 年ビームテストの際に使用した読み出し用ボード

である。この面には 144 チャンネル分のヒット信号のデジタル信号処理を行う FPGA が 1 つ搭載されている。そのため、1 つのボードのみで 1 つの HAPD のデジタル信号処理を行うことができる。図 7.2(c) にメインボードの上に接続するサブボードの写真を示す。サブボードには Ethernet コネクタが付いており、DAQ 通信、およびゲインやオフセットなど ASIC のパラメータ設定を SiTCP 通信で行える仕様になっている。ただし、Belle II 実験で使用する読み出し用ボードは Ethernet 通信による DAQ、パラメータ設定は行わない。サブボードは読み出し用ボード単体のテストに使用するために搭載した。

メインボード上には DAC が搭載されているため、ASIC に与える閾値電圧を外部から設定することができる。また、温度センサーも搭載されており、ASIC や FPGA 付近の温度を測定することが可能である。これらの機能の確認、および読み出しボードを用いて適切に HAPD からの信号読み出しができることの確認のため、性能評価を行った。

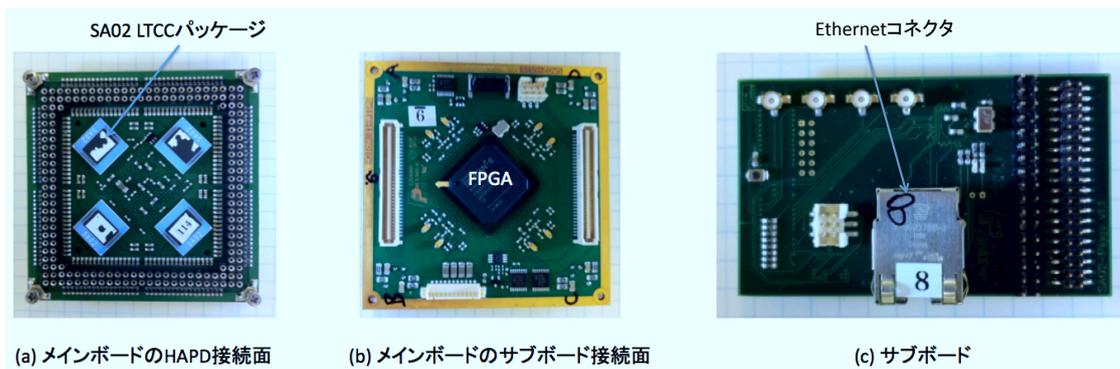


図 7.2: 新たに開発された HAPD 読み出し用ボード



図 7.3: 読み出し用ボードと HAPD の接続図

7.2 読み出し用ボードの性能評価

前節に記述したような機能を検査するため、性能評価を行った。性能評価のセットアップを図 7.4 に示す。外部からファンクションジェネレーターを用いて、10 kHz のクロック信号を入力し、DAQ、および SA02 の制御を SiTCP 通信を用いて行った。

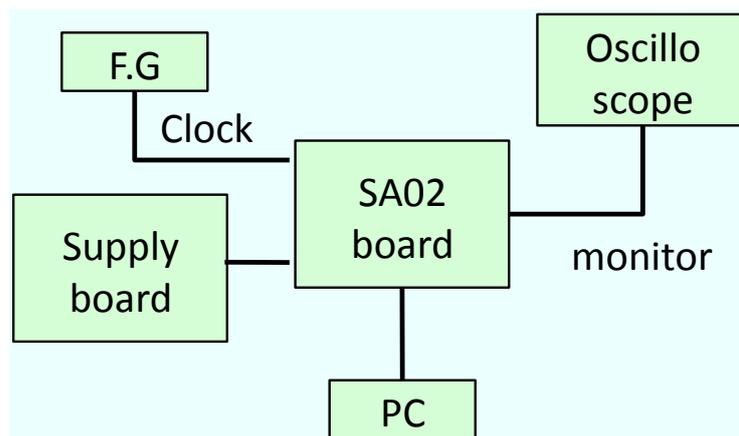


図 7.4: アナログ信号読み出しボードのセットアップ

閾値電圧の設定

本ボードにおける閾値電圧は 10bit の DAC を用いて行う。外部から閾値電圧を適切に制御するためには、デジタル設定値と閾値電圧の関係が線形的である必要がある。また、その校正定数と閾値電圧の設定範囲を求めることで適切な閾値電圧の外部制御が可能になる。そのため、これらの値に対して閾値電圧のデジタル設定値を 32 段階毎に変化させていき、デジタル設定値と閾値電圧の値の関係を調べた。

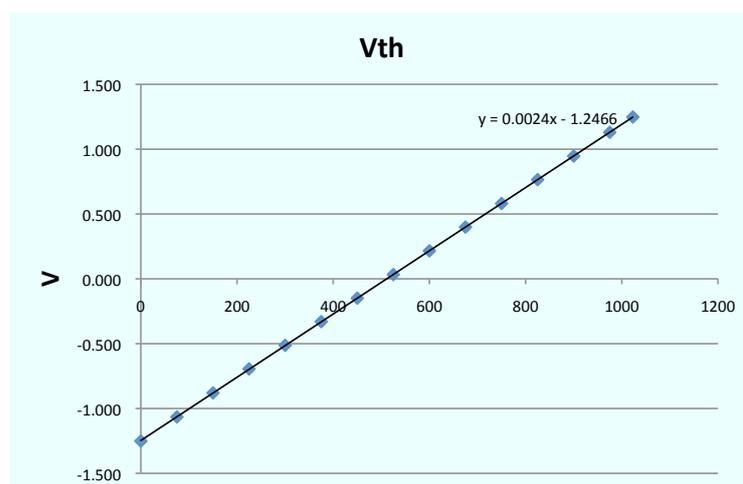


図 7.5: 閾値電圧

図 7.5 にその結果を示す。デジタル値に対して線形的に閾値電圧を $-1.25 < V_{th} < 1.25$ V の範囲に 2.4 mV 毎に設定できることが確認できた。SA02(または SA03) の増幅率

を最小値に設定した場合、HAPDからの入力信号は $50,000 e^-$ 程度であるため、出力されるアナログ波形の波高値は約160 mVである。S/N ~ 7 と仮定するとノイズ電圧は約20 mVである。そのため、2.4 mV毎に閾値電圧の設定機能は十分な精度であると考えられる。したがって、閾値電圧の設定機能は要求性能を満足していると考えられる。

温度センサーの性能評価

実験中にASICやFPGAの温度の測定を行うためにHAPD読み出しボードには温度センサーを搭載している。温度上昇により熱雑音の増加が予想されるためである。温度センサーはボードの図7.7のようにASICとFPGA付近に設置してある。本測定は適切に温度測定ができ、その値の読み出しができることを確認するために行った。本ボードに搭載されているセンサーはTexas Instruments社製TMP121を使用している。本センサーは12 bitであり、 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ の精度で -25°C から 85°C までの範囲で温度を測定することができる半導体温度センサーである。

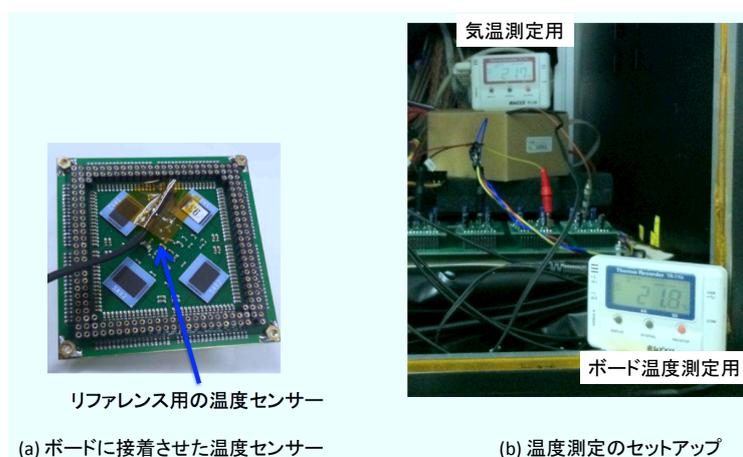


図 7.6: 温度センサー性能評価のセットアップ

図 7.6 のように箱の中に読み出しボードを入れ、電源を入れてから10秒毎に3,600秒間に渡り、温度の読み出しを行った。同時にリファレンス用の温度センサーを図 7.6(a) のように温度センサーの表面に付け、同時に温度測定を行った。リファレンス用の温度センサーはT&D社製のおんどとりである。

その結果を図 7.8 に示す。ボード上の温度センサーの値が3,500秒程度経過後にはリファレンス用の温度センサーの値と比べて 5°C 程度高くなっている。これはリファレンス用の温度センサーが外気に触れているためであると考えられる。温度の上昇傾向などは一致しているため、温度センサーの値は正しく読み出しができたと考え

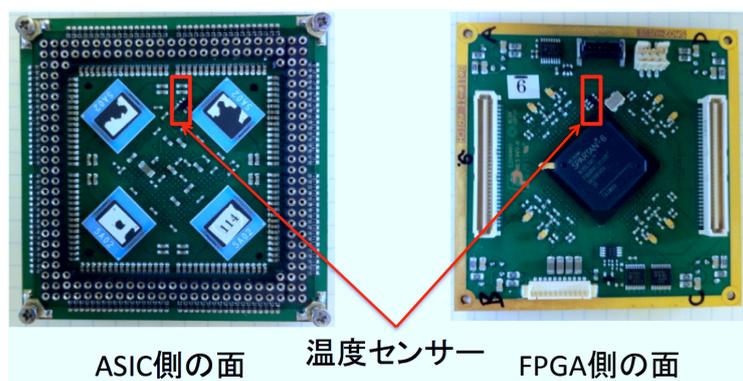


図 7.7: ボード上に搭載されている温度センサー

られる。また、ボードに電源を入れてから1時間程度時間が経つと40℃程度まで上昇することも確認できた。

以上から、ボード上の温度センサーを用いて温度測定、および読み出しを行うことができた。

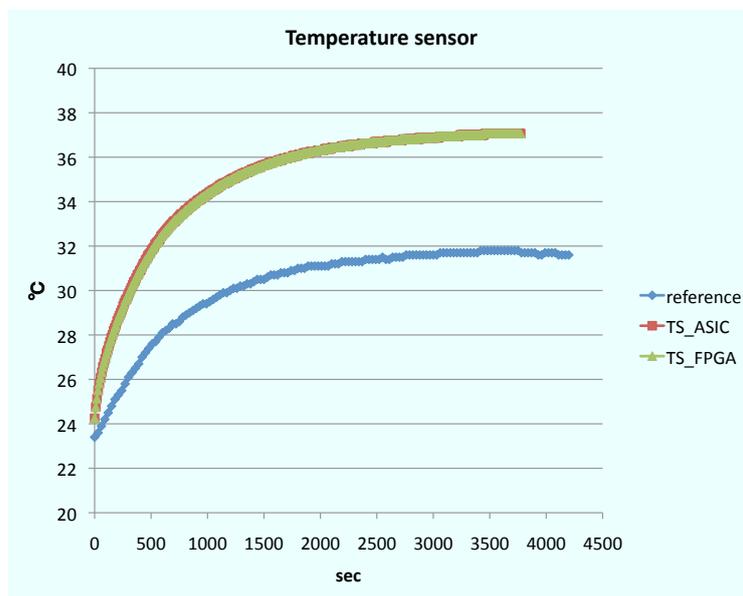


図 7.8: 温度センサーによる温度の値

HAPD 光信号読み出し試験

読み出しボードを用いて HAPD からの信号読み出し機能を確認するため、HAPD からの光信号の読み出し試験を行った。セットアップを図 7.9 に示す。ボードに 1kHz のクロック信号と LED を同期させ、1,000 回トリガーを印加し、1 mm ずつ LED を移動させるプロセスを繰り返すことを HAPD 全体の面でスキャンを行った。なお、本測定では LED の光量を多光子にして行った。図 7.10 はそのスキャンの結果である。このように、HAPD の信号読み出しを HAPD の全体に渡って行うことができた。なお、検出効率の悪い部分は HAPD、あるいは SA02 のデッドチャンネルである。また、左下のチップは HAPD 自身の不良チップであるため、検出効率が全体的に悪くなっている。したがって、ボードの読み出し機能による問題ではない。

本測定により、読み出し用ボードを用いて HAPD から適切に光検出信号の読み出しができることを確認した。

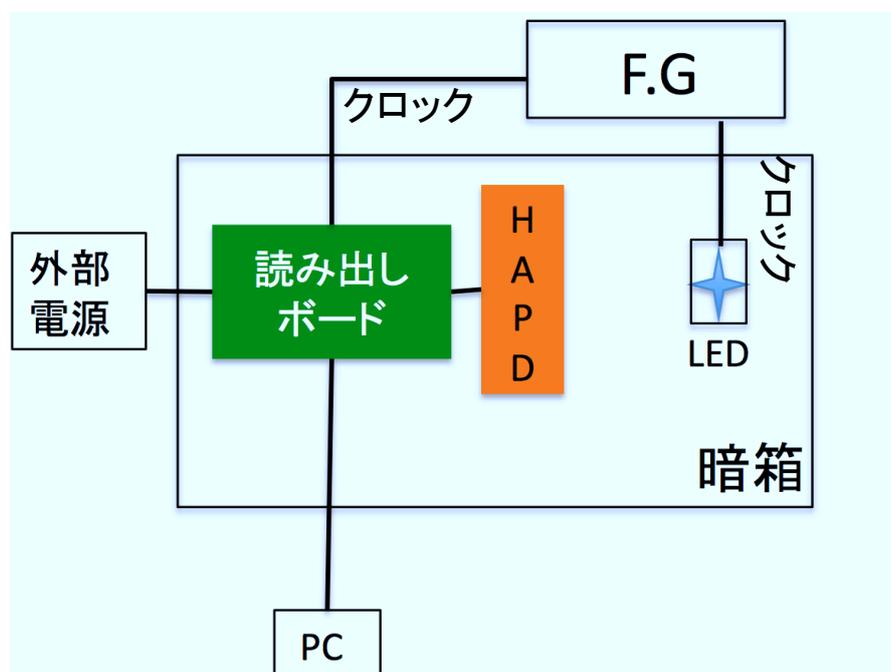


図 7.9: 光信号読み出しのセットアップ

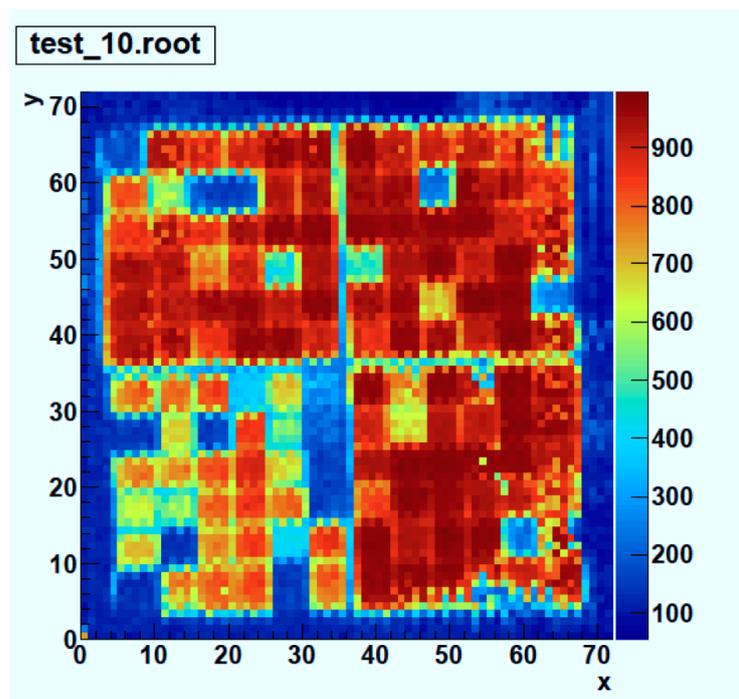


図 7.10: HAPD 光信号読み出し結果

7.3 読み出し用ボード性能評価のまとめ

LTCC パッケージ化した SA02 を搭載し、小型化した読み出し用ボードの性能評価を行った。閾値電圧の設定や温度センサーの適切な動作を確認、および HAPD から光検出信号の読み出しに成功した。以上から、小型化した読み出し用ボードは HAPD 信号読み出しのための基本的な性能を満たしていることを確認した。

第8章 読み出し用ASIC SA03 性能評価用ボードの開発

A-RICH では HAPD を 456 個使用する予定であり、1つの HAPD の読み出しに SA03 は 4つ必要であるため、約 2,000 個の SA03 を生産する予定である。そのため、SA03 を迅速に性能評価することができるシステムが必要である。そこで、同時に複数の SA03 の性能評価を行うことができるボードを設計し、開発した。以下、その性能評価用ボードの性能について記述する。

8.1 性能評価用ボードの概要

性能評価用ボードはメインボードとサブボードの2つのボードから成る。メインボードに FPGA などの素子や電源を設置し、サブボードに LTCC パッケージの SA03 を配置することができるソケットを配置した。図 8.1 にその写真を示す。

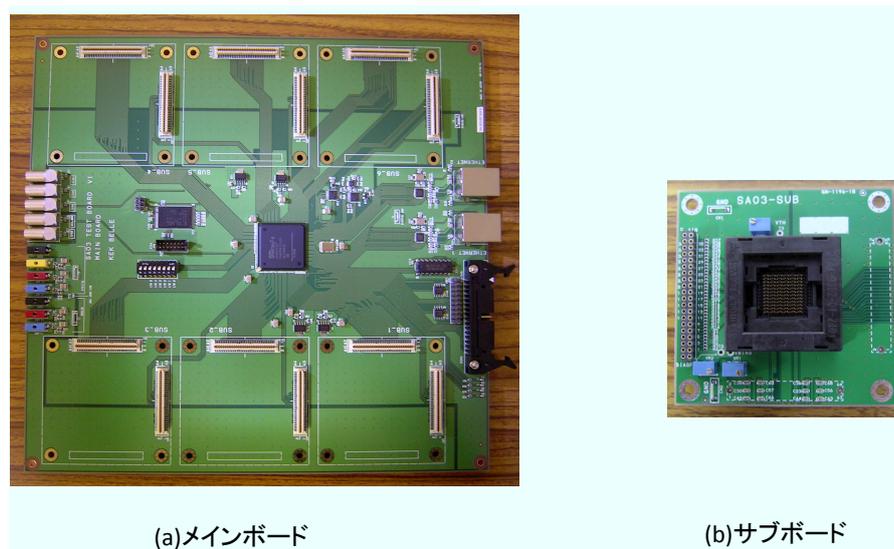


図 8.1: 性能評価用ボードのメインボードとサブボード (右) の写真

メインボードの上にスタンド型のコネクタが配置されており、この上にサブボードを接続し、サブボードに設置したSA03と通信を行う。メインボードとサブボードを分けた理由はFPGAが故障した場合、ソケットが全て無駄になることを防ぐためである。また、ソケットのみ破損した場合も取り替えサブボードを変えることによって6つのSA03を測定することができる。最大サブボードは6個接続することができるため、最大6個のSA03をテストすることが可能である。

SA03とのデータ通信、およびFPGAやSA03の制御などはSiTCPを用いて行う。SiTCP通信の特徴として、安定した高速データ転送が可能であり、回路規模が小さくできるため、SiTCP通信方式を採用した。[17]また、通信を高速化するため、Ethernetケーブルを2つ設置し、それぞれのポートでTCP通信とRBCP通信を行う仕様とした。図8.2にその通信システムのプロットを示す。

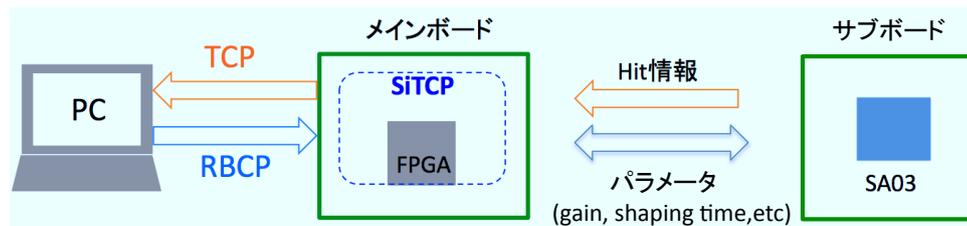


図 8.2: メインボードとサブボードの SiTCP 通信のプロット

8.2 性能評価用ボードの設計

本節では性能評価用ボードの期待される性能、搭載した素子について記述する。本ボードに搭載したFPGAはXilinx社製のSpartan6を使用しており、それぞれパッケージはFG(G)676、デバイスはXC6SLX100を使用した。また、ROMには本FPGAに対応しているXCF32PVOG48Cを採用した。このROMによってFPGAに設定したパラメータの保存が可能である。

FPGAのピン数から最大6個まで接続可能であったため、6個のサブボードと繋げることができるようになっている。また、測定はこれまでのSA02,SA03の性能評価のようにThreshold scanによって行うため、DACの機能が必要である。そのため、ポテンショメータのAD5232を採用した。AD5232は8bitで制御できるため256段階の閾値電圧の設定が可能である。また、SA03に入力するテストパルスを生成するために、AD5232をもう1つ設置した。これにより0~3.3Vの間の大きさのテストパルスを生成することができる。また、本ボードにはアナログ信号をモニターするために3bitのマルチプレクサCD74HC4051Eを設置した。これにより6つのSA03からの信号をモニターするか選択することができる。なお、DIP-SWはSiTCP通信の

アドレス設定のために、AT93C46D は SiTCP 通信用の ROM に使用する。Ethernet ケーブルのコネクタには一般的に使用されている LAN8710 を採用した。図 8.3 にこれらの素子の配置図、図 8.4 に各素子の配線図を示す。

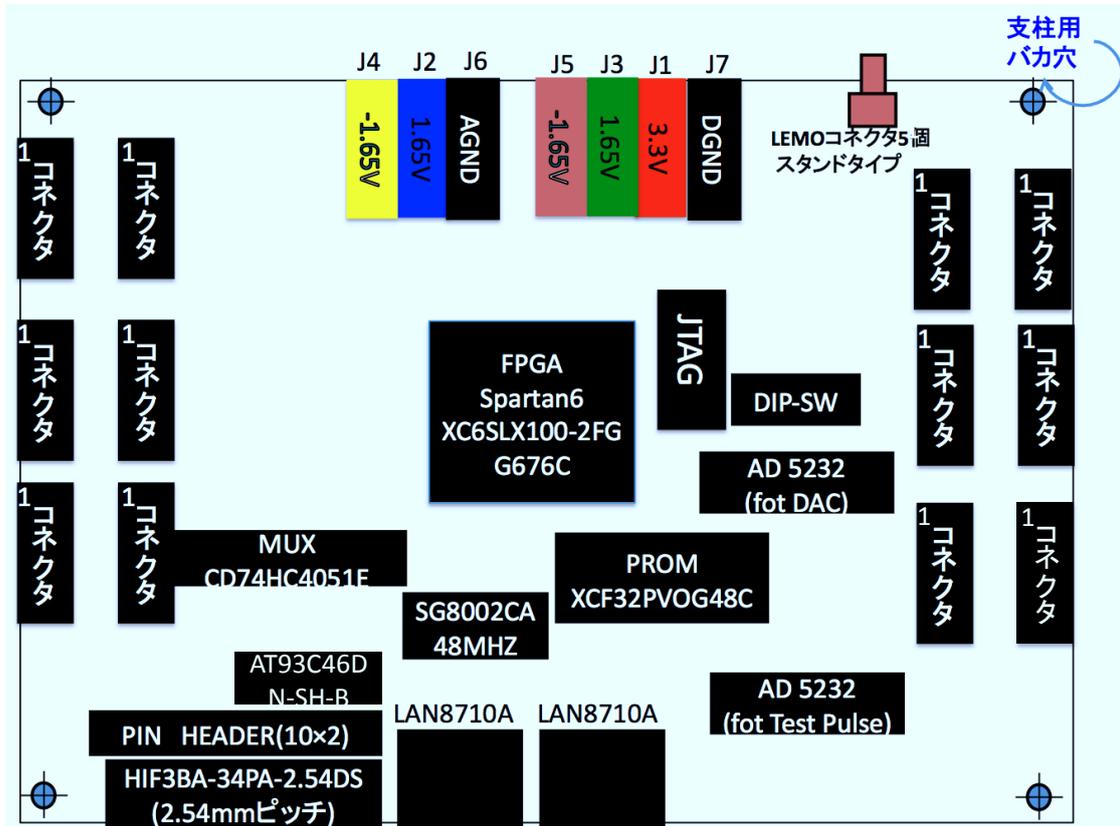


図 8.3: メインボード上の素子の配置図面

8.3 性能評価用ボードのまとめ

SA03 の大量生産に向けて 6 つの SA03 を同時に性能評価をすることができるボードを設計し、開発した。今後は FPGA のファームウェア設計など、ボードを動作させるためのシステムを開発する必要がある。

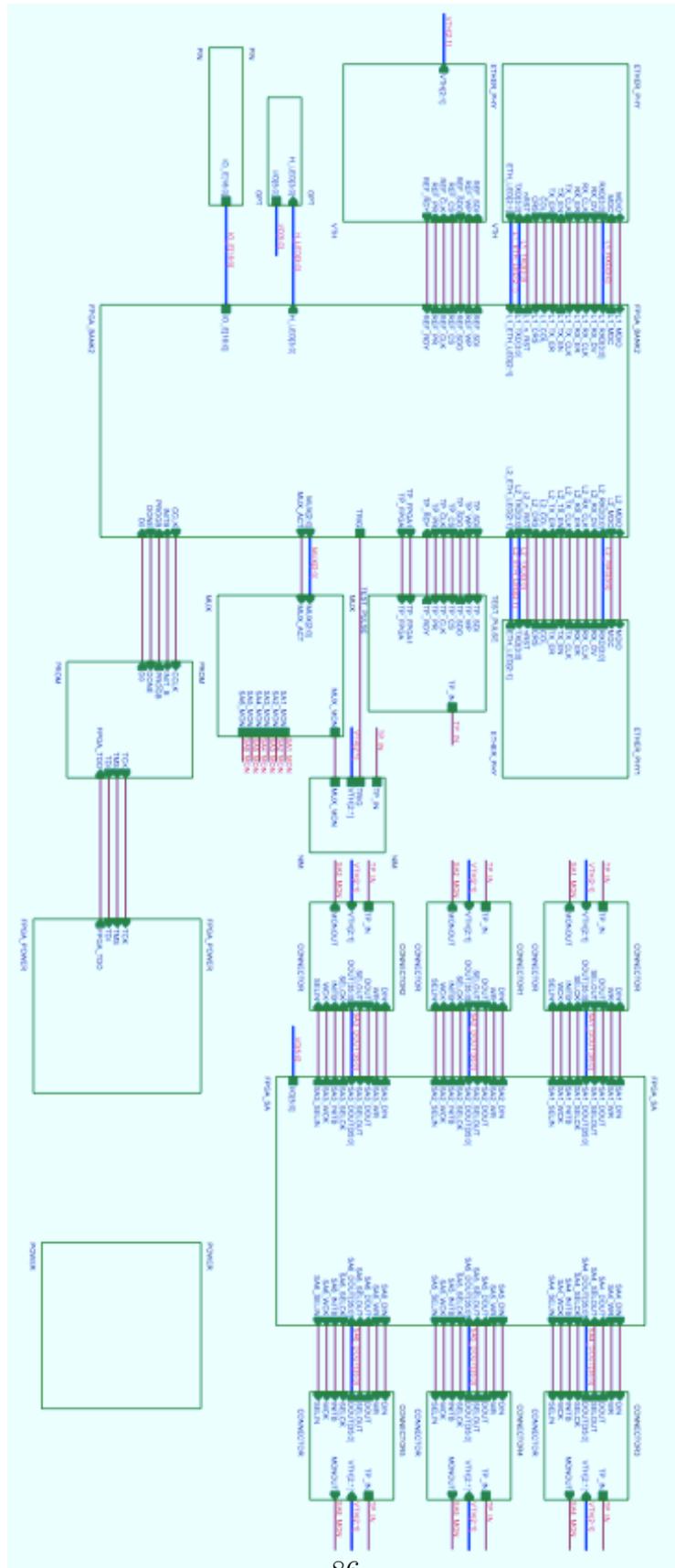


図 8.4: メインボードの回路図。各素子通しの配線を示している

第9章 A-RICHにおける読み出しシステム開発の今後の予定

本章では Belle II 実験開始に向けた A-RICH の読み出しシステムの今後の課題、および予定について述べる。

9.1 SA03 の開発予定

Belle II 検出器 A-RICH における読み出し用 ASIC SA03 は十分な性能を満たしていることを確認することができた。今後は LTCC パッケージ版の SA03 を試作し、性能を確認することが必要である。

今後、Belle II 実験に向けて SA03 を大量生産するため、8 章に記述した SA03 性能評価用ボードを用いて、迅速に性能評価をするためのシステム構築が課題である。

9.2 Merger Board の開発

3 章に記述したように Belle II 実験においてデータ収集は Belle2Link という光ファイバーケーブルを用いた Belle II 全体で共通のシステムを使用することが決まっている。A-RICH では HAPD からの信号を SA03 と FPGA によって処理した後、Merger Board によって信号を中継し、データを圧縮させた後、Belle2Link に信号を送り出すことが決まっている。

現在、その Merger Board の第 1 版を開発しテストを進めている。図 9.2 がその写真である。第 1 版ではフロントエンドボードからの信号ケーブルとの中継するためのコネクタは 4 つとなっているが、Belle II 実験に使用する際は最終的に 6 つにする予定である。

このように読み出しシステム開発の今後の予定としては、大量生産した SA03 の性能評価システムの開発、Merger Board のファームウェアの開発、また SA03 を搭載した読み出しボードの開発が課題となる。

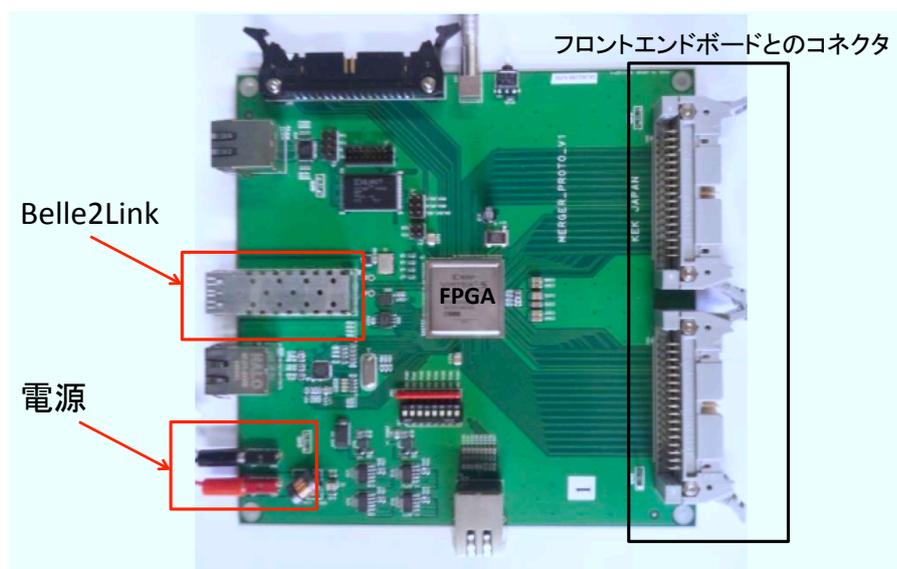


図 9.1: 試作版 Merger Board の写真

第10章 まとめ

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 Belle 実験はその目的を見事に果たし、2008年の小林、益川氏のノーベル賞という素晴らしい成果と共に大成功を収めた。Belle 実験の結果には標準模型を超える新しい物理の存在を示唆する結果が含まれていた。Belle II 実験では新しい物理の発見、および除外のため、Belle 実験で使用した KEKB 加速器を Super KEKB 加速器に、Belle 検出器を Belle II 検出器にアップグレードし、Belle 実験よりも高い精度での B 中間子系の崩壊の測定を行う。

Belle 検出器における K/π 識別装置 ACC は Flavor tagging のため、 $0.5 < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ の運動量領域に特化していた。しかし、実際には Endcap 部には高い運動量の K 中間子や π 中間子も多く飛来することがシミュレーションなどにより予想されている。 $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ など新しい物理に対して感度の高いモードの崩壊を精度良く検出するためにはそれらの高い運動量を持つ K 中間子や π 中間子の識別精度の向上が必要である。

そこで、Belle II 検出器における Endcap 部の粒子識別装置として我々は A-RICH の開発を行っている。Cherenkov 光の放射角は荷電粒子の質量に依存する原理を応用し、A-RICH は Cherenkov 光をリングイメージとして捉え、その放射角を測定することで粒子識別を行う装置である。A-RICH では $0.5 < p < 4.0 \text{ GeV}/c$ の運動量領域の K 中間子と π 中間子の識別を 4σ の精度で行うことを目指している。

A-RICH には Cherenkov 光を発生させるためのシリカエアロゲル、Cherenkov 光を検出する光検出器 HAPD、そしてその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は 1 光子検出、1.5 T の磁場中での動作、 K/π の放射角差に相当する約 5 mm 以下での位置分解能である。

A-RICH における読み出しシステムには高増幅、低雑音のアンプ機能、コンパクト化、多チャンネル同時読み出し機能が要求される。これらの要求性能を満たすため、A-RICH のフロントエンド部は ASIC と FPGA の 2 種類の集積回路で構成される。これまで我々は A-RICH で使用する読み出し用 ASIC である SA シリーズの 2nd version である SA02 まで開発し、基本的な要求性能を満たしたことを確認してきた。しかし、HAPD が中性子損傷によりノイズが増加してしまうため、それを抑えるために SA02 のアナログ波形の Shaping time を最適値である $100 < \tau < 200 \text{ [ns]}$ に調節する必要があることが、2010 年に行われた中性子照射試験からわかったため、SA シリーズの 3rd version である SA03 は Shaping time を $100 < \tau < 200 \text{ [ns]}$ の範囲

に調節できるように設計した。

本研究ではSA03のShaping timeを $100 < \tau < 200$ [ns]の範囲に調節できることや、増幅機能など基本的な性能を確認するため、Tanner社のアナログ回路シミュレーターTSpiceTMを用いて動作検証を行った。その結果、Shaping timeを $100 < \tau < 200$ [ns]の領域に調節でき、かつその他各種機能もSA02と同様に要求性能を満たしている設計となっていることを確認できた。

そして、2011年秋にSA03の試作品であるQFP版が完成し、その性能評価を行い、要求性能を満たしていることを確認した。SA03のShaping timeは設計値より長い値であることがわかったが、最適値領域にShaping timeを調節できるため、Belle II 検出器におけるA-RICHの読み出し用ASICとして使用できると考えられる。また、SA02まではゲインやShaping timeなどのパラメータ設定を破壊読み出し方式で行っていたが、SA03では非破壊読み出し方式に改良を行い、SA03の実機を用いて非破壊読み出し機能を確認することができた。

また、SAシリーズの放射線耐性を試験するためにSAシリーズの第2版であるSA02にガンマ線、中性子の照射試験を行った。それぞれBelle II実験10年分に相当する量を照射した。照射前後のノイズ量を比較した結果、変化が見られなかったため、SAシリーズの放射線耐性を確認することができた。

また、新たにLTCCパッケージのSA02を搭載した読み出し用ボードを開発した。SA01を搭載した読み出し用ボードは読み出しのための性能は満たしていたが、A-RICHへの設置のために更に小型化する必要があった。そこで、新たにASICをQFPからLTCCパッケージにすることで小型化し、それを搭載した読み出し用ボードを新たに開発した。読み出し用ボードはビーム軸方向に対して約3 cmの厚さまで小型化した。本研究では新たに開発した読み出し用ボードの性能評価を行い、HAPDからの光信号の読み出しやASIC SA02に与える閾値電圧の外部制御、および温度センサーなど各種機能を確認し、読み出し用ボードが要求性能を満たしていることを確認した。

また、Belle II実験ではHAPDを456個設置する予定である。1つのHAPDに対して読み出しASIC SA03を4つ使用する。したがって、Belle II実験に向けて約2,000個のASIC SA03を大量生産するため、それらを迅速に性能評価するシステムが必要である。そこで、SA03の性能評価を行うためのテストボードを設計、開発した。本ボードを用いることで同時に6個のSA03を性能評価することができる。

以上から、Belle II検出器におけるA-RICHの読み出しシステムのフロントエンドの読み出しシステムは概ね完成した。今後はフロントエンドからの信号を中継、データ圧縮し、Belle II実験全体のDAQシステムであるBelle2Linkに信号を送り出すMerger Boardのファームウェアの開発、および大量生産したSA03を迅速に性能評価するためのソフトウェアの開発がA-RICHの読み出しシステム全体の今後の課題となる。

謝辞

本研究は沢山の方の御協力，御指導を頂きました。ここに感謝の弁を述べさせていただきます。

まず，Belle II 実験の測定器アップグレードに参加する機会を与えて頂いた住吉孝行教授に感謝致します。住吉教授は未熟な私に自身の貴重な時間を割いて，実験的，理論的な知識を与えて頂きました。また，汲田哲郎助教には初歩的な質問からエレクトロニクスにおける専門的な部分までご丁寧にわかりやすく教えて頂きました。感謝致します。角野秀一准教授には様々な助言を頂き大変感謝しております。

そして，Aerogel RICH 検出器開発グループに加えて頂いた，高エネルギー加速器研究機構の足立一郎准教授，西田昌平助教，原康二助教に感謝致します。足立一郎准教授にはミーティングなどで様々な助言を頂きました。原康二助教には定量的な実験データの扱い方など実験の基礎を丁寧に指導して頂きました。

西田昌平助教にはエレクトロニクスの基礎的な部分からデータ解析方法の開発方法，そして回路設計の指導まで研究を進める上で沢山の御指導を頂きました。

また，宇宙航空研究開発機構の池田博一教授にはSA03の設計・開発の際に数多くの助言を頂きました。感謝致します。

また，SA03の性能評価用ボード設計の際にジー・エヌ・ディー(有)の宮沢様に沢山の助言を頂きました。感謝致します。

首都大学東京においては千葉雅美助教，前田順平特別研究員，松原綱之特別研究員にはミーティングなどで大変有益な助言を頂きました。感謝しております。

また，自身の多くの時間を割いて頂き，理論から実験までご丁寧に御指導頂いた岩田修一氏に感謝致します。坂下嘉徳君，同グループの東邦大学の森和香奈氏，東京理科大学の樋口雅弘君には沢山の協力をして頂きました。感謝致します。また，Belle II Japan Studentsの皆様は多くの議論をして頂き，研究を進める上で刺激を頂きました。感謝致します。

高エネルギー実験研究室の同期として下島すみれ氏，塚越健人氏，東京工業大学の田村滋氏とは共に支え合い研究を進める事ができました。高エネルギー実験研究室で関わって頂いた皆様に感謝致します。また，光物性研究室の小岩井貴瑛氏からしばしば激励の言葉を頂きました。感謝致します。

最後に本研究に専念するため支援して頂いた両親と家族，および親族に感謝の意を述べさせていただきます，謝辞と致します。

参考文献

- [1] Z. Dolezal and S. Uno Belle II Collaboration, , “ Belle II Technical Design Report, ” KEK-REPORT-2010-1, Jul. 2010.
- [2] 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. 27, pp.138-140(1964).
- [3] M. Kobayashi and T. Maskawa, “CP-Violation in the Renormalization Theory of Weak Interaction”, Prog. Theor. Phys. **49**, pp.552-657 (1973).
- [4] , L. Wolfenstein “Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix’, Phys. Rev. Lett. doi:10.1103/PhysRevLett.51.1945 (1983).
- [5] A. B. Carter and A. I. Sanda Phys. Rev. Lett. **45**, 952 (1980).
- [6] K. Abe, *et al.* Phys. Rev. Lett. **87**:091802,2001.
- [7] BaBar Collaboration, B. Aubert, *et al* arXiv:hep-ex/0407057v2
- [8] A. G. Akkeroyd, *et al.* [BELLE collaboration], “Physics at Super B Factory ”, arXiv:1002.5012v1 [hep-ex].
- [9] J.-T. Wei,*et al.* Measurement of the Differential Branching Fraction and Forward-Backward Asymmetry for $B \rightarrow K^*l^+l^-$ (2009)
- [10] T. Abe *et al.* Compensation of the Crossing Angle with Crab Cavities at KEKB
- [11] Belle HP. <http://belle2pb.kek.jp/Detector>
- [12] H.Hamasaki *et al.*Belle note ”Kaon Identification in BELLE ”
- [13] Belle note 1137
- [14] T. Calin, M. Nicolaidis, R. Velazco, “Upset hardened memory design for sub-micron CMOS technology ”. Nuclear Science, IEEE Transactions on, Volume 43, Issue 6, Dec. 1996 Page(s):28742878
- [15] KOA 株式会社 HP, <http://www.koaproducts.com/topics/ltcc.php>

- [16] T. Higuchi, TWEPP2011
- [17] Uchida, Tomohisa IEEE Transactions on Nuclear Science. vol. 55, no. 3, 2008.6, pp. 1631-1637
- [18] 黒田英諒 首都大学東京大学院 理工学研究科 修士論文 (2010).
- [19] 椎塚晋 名古屋大学大学院 理工学研究科 修士論文 (2010)
- [20] 岩田修一 首都大学東京大学院 理工学研究科 修士論文 (2011).
<http://hdl.handle.net/10748/4135>
- [21] 今村美貴 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文 (2011).