1

b

# １９９７年度 修士学位論文
# BELLE 検出器用 CsI 電磁カロリメータにおける
# トリガーシステムの設計・製作

奈良女子大学大学院理学研究科

物理学専攻

高エネルギー物理学講座

横井　恵美

1998 年 2 月

# 目次

**はじめに** **1**

**1 $B$ 中間子の物理** **3**

1.1 CP の破れ . . . . . 3

1.2 小林・益川模型と B 中間子 . . . . . 4

1.3 $B$ 中間子系での CP 非保存とその測定 . . . . . 6

1.3.1 $B^0$ – $\overline{B^0}$ 混合 . . . . . 6

1.3.2 $B$ 中間子の崩壊における CP 非対称 . . . . . 7

1.4 $B$ 中間子の生成 . . . . . 9

1.4.1 $\Upsilon(4S)$ . . . . . 9

1.4.2 走る $B$ 中間子 . . . . . 9

**2 KEK-$B$ ファクトリー** **11**

2.1 KEKB 加速器 . . . . . 11

2.1.1 非対称衝突型加速器 . . . . . 11

2.1.2 ルミノシティ . . . . . 13

2.2 BELLE 検出器 . . . . . 13

2.2.1 全体の構造 . . . . . 13

2.2.2 各部の構成 . . . . . 14

**3 BELLE 検出器におけるトリガーシステム** **23**

3.1 事象と頻度 . . . . . 23

3.2 トリガーの条件 . . . . . 27

3.3 トリガーシステムへの要求 . . . . . 28

3.4 基本構想 . . . . . 29

3.4.1 一般的なトリガー / データ収集方法 . . . . . 29

3.4.2 BELLE のトリガー / データ収集方法 . . . . . 29
3.5 BELLE トリガーシステム . . . . . 30
3.6 BELLE データ収集システム . . . . . 30

**4 ECL トリガーシステム** **33**
4.1 電磁カロリメータ . . . . . 33
4.2 BELLE CsI 電磁カロリメータ . . . . . 34
4.2.1 構造 . . . . . 34
4.2.2 カロリメータへの要求 . . . . . 34
4.2.3 CsI(Tl) 結晶 . . . . . 34
4.2.4 CsI カウンター . . . . . 38
4.2.5 カロリメータ信号の精密測定 . . . . . 40
4.2.6 カウンターのエネルギー分解能 . . . . . 43
4.3 カロリメータから出されるトリガー信号 . . . . . 43
4.3.1 全エネルギー和トリガー . . . . . 46
4.3.2 クラスター計数トリガー . . . . . 46
4.3.3 物理事象のトリガー条件 . . . . . 46
4.3.4 Bhabha トリガー . . . . . 47
4.3.5 宇宙線バックグラウンドの除去 . . . . . 47
4.4 ECL トリガーエレクトロニクス . . . . . 49
4.4.1 トリガーの概要 . . . . . 49
4.5 サム / トリガーモジュール . . . . . 50
4.5.1 入力 . . . . . 53
4.5.2 ゲート出力 . . . . . 53
4.5.3 タイミング信号 . . . . . 53
4.6 クラスター計数モジュール (CCM) . . . . . 54
4.7 コネクターボード . . . . . 54
4.8 アナログアッダーモジュール (タイプ A、B) . . . . . 55
4.9 全エネルギー / バーバーモジュール . . . . . 55
4.10 ECL トリガーマスター . . . . . 55
4.11 モジュールの配置 . . . . . 58
4.11.1 TKO ステーション . . . . . 58

**5 アナログアッダーモジュールの開発 59**

5.1 モジュールの機能と設置場所 . . . . . 60
5.2 モジュールの機能 . . . . . 60
5.3 信号の伝送 . . . . . 60
5.4 電流駆動方式に関するテスト . . . . . 63
5.4.1 トランスコンダクタンスアンプ . . . . . 64
5.4.2 トランジスタによる電流駆動回路 . . . . . 64
5.4.3 臨界周波数 . . . . . 69
5.4.4 ノイズ減少に関するテスト . . . . . 70
5.4.5 結論 . . . . . 73
5.5 試作モジュールのテスト — タイプ A . . . . . 73
5.5.1 モジュールの概要 . . . . . 73
5.5.2 線形性 . . . . . 75
5.5.3 大きな信号に対する応答 . . . . . 78
5.6 試作モジュールのテスト — タイプ B . . . . . 78
5.6.1 モジュールの概要 . . . . . 78
5.6.2 線形性 . . . . . 79
5.6.3 クロストーク . . . . . 79
5.7 本番の状況に即したテスト . . . . . 83
5.8 結論 . . . . . 84

**6 まとめ 87**

# 図一覧

1.1 クォークの混合 . . . . . 4
1.2 ユニタリティ三角形 . . . . . 5
1.3 $B\overline{B}$ 混合のボックスダイアグラム . . . . . 6

2.1 KEKB 加速器 . . . . . 12
2.2 BELLE 検出器 . . . . . 15
2.3 BELLE 検出器側面図 . . . . . 16
2.4 Silicon Vertex Detector . . . . . 17
2.5 Central Drift Chember . . . . . 18
2.6 Aerogel Čerenkov Counter . . . . . 20
2.7 Time of Fright . . . . . 21
2.8 $K_L, \mu$ detecter . . . . . 22

3.1 $B\overline{B}$ 対生成 . . . . . 24
3.2 コンティニューム . . . . . 24
3.3 レプトン対生成 . . . . . 24
3.4 Bhabha 散乱 . . . . . 25
3.5 $\gamma\gamma$ 生成 . . . . . 25
3.6 2 光子過程 . . . . . 26
3.7 BELLE トリガーシステム . . . . . 31
3.8 BELLE データ収集システム . . . . . 32

4.1 カロリメータの構造 . . . . . 35
4.2 CsI(Tl) 結晶の形 . . . . . 36
4.3 結晶の配列の様子 . . . . . 37
4.4 CsI(Tl) カウンターの構造 . . . . . 40
4.5 ECL 読み出しシステムの概要 . . . . . 41

4.6 CsI(Tl) カウンターの分解能 . . . . . 44
4.7 トリガーセル . . . . . 45
4.8 Bhabha トリガーのためのカロリーメータの区分 . . . . . 48
4.9 宇宙線除去のための区分 . . . . . 49
4.10 ECL エレクトロニクス . . . . . 51
4.11 Sum/Trigger Module . . . . . 52
4.12 コンスタントフラクションディスクリミネータの原理 . . . . . 54
4.13 $E_{TOT}$/Bhabha Module . . . . . 56
4.14 ECL Trigger Master . . . . . 57

5.1 トリガーセル ∼ $\phi$ リング和 . . . . . 61
5.2 電圧駆動 . . . . . 62
5.3 電流駆動 . . . . . 63
5.4 トランスコンダクタンスアンプによる回路 . . . . . 64
5.5 トランスコンダクタンスアンプの線形性 . . . . . 65
5.6 トランジスタを用いた電流駆動回路 . . . . . 66
5.7 トランジスタによる回路の線形性 . . . . . 67
5.8 30m のケーブルによる信号伝送の線形性 . . . . . 68
5.9 入力信号の周波数により波形が変化する様子。a 左: 周波数 140kHz のとき 右: 周波数 220kHz のとき . . . . . 69
5.10 臨界周波数 . . . . . 70
5.11 ノイズ減衰テストのセットアップ . . . . . 71
5.12 ノイズ減衰 . . . . . 71
5.13 ノイズ減衰率 . . . . . 72
5.14 タイプ A モジュール全景 . . . . . 74
5.15 タイプ A 回路図 . . . . . 75
5.16 タイプ A の出力 . . . . . 76
5.17 タイプ A の線形性 . . . . . 77
5.18 アナログ和 . . . . . 78
5.19 アナログ和のチェック . . . . . 79
5.20 タイプ B モジュール全景 . . . . . 80
5.21 タイプ B 回路図 . . . . . 81
5.22 タイプ B の線形性 . . . . . 82

5.23 クロストーク . . . . . 83
5.24 クロストーク . . . . . 84
5.25 タイプ A とタイプ B の線形性 . . . . . 85
5.26 タイプ A とタイプ B の線形性；30m ケーブルで接続した場合 . . . 86

# 表一覧

2.1 各々の目的 . . . . . 14

3.1 事象の頻度 . . . . . 27
3.2 物理事象のトリガー条件 . . . . . 27
3.3 トリガー後の事象頻度 . . . . . 28

4.1 フォトダイオードの仕様 . . . . . 39
4.2 プレアンプの性能テスト結果 . . . . . 39
4.3 Bhabha トリガーの条件 . . . . . 48
4.4 物理事象のトリガー効率 . . . . . 50

5.1 Analog Adder type-A の仕様 . . . . . 76

# はじめに

「なぜ、自然界に反粒子という存在があるのか？」

陽電子 (1932 年アンダーソン)、反陽子 (1955 年セグレ) が発見された頃、すでにディラックの方程式は知られていた。しかし、当時の物理学者にとって反粒子の存在は、非常に奇妙なものに思えたであろうと予想される。

その後の加速器の発達は、反粒子の存在をごくありふれたものにした。そして、さらなる研究の進展により、エネルギーの十分高い世界においては粒子と反粒子の対称性が非常に良く成り立つことがわかってきた。では、「なぜ我々の宇宙には、粒子の存在しかないのか？」今日の物理学者たちは、逆にこのような疑問を抱くようになった。この疑問に答えるには、自然界が僅かに示す粒子と反粒子の対称性の破れ（厳密には CP 対称性の破れ）という現象をより深く理解することが重要である、と現在では考えられている。

CP 対称性の破れは 1964 年、$K$ 中間子の系において初めて観測された。30 年以上経った現在においても、$K$ 中間子以外の系における CP 非保存の現象は未発見である。ただ、1982 年にカーター・三田が初めて指摘したように、「重い $b$ クォークと軽いクォークの系である $B$ 中間子系において、大きな CP の破れ ($\sim$ 10%) が存在するということが期待されている。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で進行中の $B$ ファクトリー計画は、電子・陽電子の衝突によって $b$ クォークと $\overline{b}$クォーク の共鳴状態である $\Upsilon(4S)$ 状態を作り、その崩壊で得られる $B$ 中間子を大量生成して、この $B$ 中間子系における CP 非保存現象を解明することを目的としている。

加速器（KEKB）と検出器（BELLE）の建設は順調に進んでおり、現在その最終段階にある。早ければ、今年。1998 年秋には実験を開始する予定である。

本論文では著者の担当してきた、BELLE 検出器の重要な構成要素である CsI 電磁カロリメータの読み出し系、特にカロリメータのトリガーシステムの設計及び製作についての報告を行う。

トリガーシステムとは一般に、読み出したい物理事象を素早く選別し、事象読み出し信号を送るシステムである。

検出器内では、電子·陽電子の衝突による物理事象だけでなく、宇宙線、ビームバックグラウンドなど様々な事象が生じる。そのため、欲しい事象のみを素早く判断し（BELLE では $2.2\mu sec$ 内）、かつ効率的に収集することが非常に重要となってくる。

電磁カロリメータは電子·陽電子、光子のエネルギーを測定する検出器であり、カロリメータトリガーは、測定されたエネルギーから $\Upsilon(4S) \rightarrow B\overline{B}$、Bhabha 散乱事象を選別してトリガー信号を出すシステムである。BELLE 検出器では、このカロリメータトリガーと飛跡検出器から出される飛跡トリガーが、主なトリガーシステムである。

本論文は全六章からなる。第一章では小林·益川の標準理論から B 中間子の物理、第二章で KEKB 加速器、BELLE 検出器について述べ、第三章では BELLE 検出器全体のトリガーシステムについて説明する。そして第四章、五章で CsI 電磁カロリメータのトリガーシステムについて報告し、第六章で全体のまとめを行う。

# 第 1 章

# $B$ 中間子の物理

## 1.1 CP の破れ

自然界には様々な対称性が存在しており、相互作用において、それらの対称性は保存されていると考えられている。ところが、原子核の崩壊によって発見された弱い相互作用で、いくつかの対称性が破れていることが知られている。

空間反転を行う P 変換の対称性が弱い相互作用において破れている可能性のあることが 1956 年、リーとヤンによって予言され、翌年ウー達によって発見された。また、粒子の荷電共役（粒子と反粒子の交換）をとる C 変換の場合、たとえば、崩壊 $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ に荷電共役変換を施したら、この変換はスピンの向きを変えないので、左巻きの反ニュートリのが出てこなければならなくなる。右巻きのスピンを持つニュートリノや、左巻きの反ニュートリノは（ほとんど）存在しないことが実験からわかっているので、ニュートリノが関わる崩壊は、C 変換に対して不変ではない。

ところが、これら両方を同時に行う CP 変換を考えると、左巻きニュートリノは右巻きハンニュートリノに変わるので、この CP における不変性は破られていないと考えられてきた。

しかし、1964 年クリステンソン達が、中性 $K$ 粒子の崩壊の崩壊において、CP 対称性が破れている証拠を摑んだ [1]。そして 1973 年、小林・益川は「クォークが 3 世代 6 種類のフレーバーを持ち、それらが混合を起こしているならば、CP の破れは必然的に導かれる」という仮説を発表した [2]。さらに、CP の破れは $B$ 中間子系で大きく見えるだろうことが三田・カーターにより指摘された [3]。

続くセクションでは、この小林・益川の予言について述べる。

## 1.2 小林 · 益川模型と B 中間子

クォークは、その質量固有状態が弱い相互作用の固有状態とは異なる。そのため、弱い相互作用においてはクォークが他の世代のクォークに崩壊するというクォークの混合が起こる（図 1.1）。

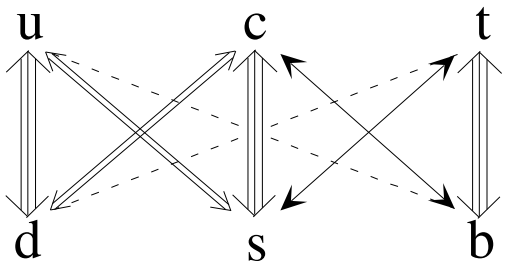


図 1.1: クォークの混合

この混合の割合を表すのが、カビボ · 小林 · 益川 (CKM) 行列である。

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

小林 · 益川は、クォークの世代が少なくとも 3 世代あることによって CP の破れを引き起こす複素位相が行列要素に入り得ることを示した。

ヴォルフェンシュタイン表示 [4] では、

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

と表される。これを見ればわかるように、CP を破る複素位相はパラメータ $\eta$ に現れる。

これまでの実験で得られた混合の割合から、各パラメータは次のように表される。

$$\lambda = 0.221 \pm 0.002$$

$$A = 0.798 \pm 0.082$$

$$\sqrt{\rho^2 + \eta^2} = 0.33 \pm 0.068$$

CKM 行列はユニタリー行列であるので、$V^\dagger V = 1$ から次の式が得られる。

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0$$

これは複素平面上で三角形を描きユニタリティ三角形と呼ばれる (図 1.2 ) 。 そ

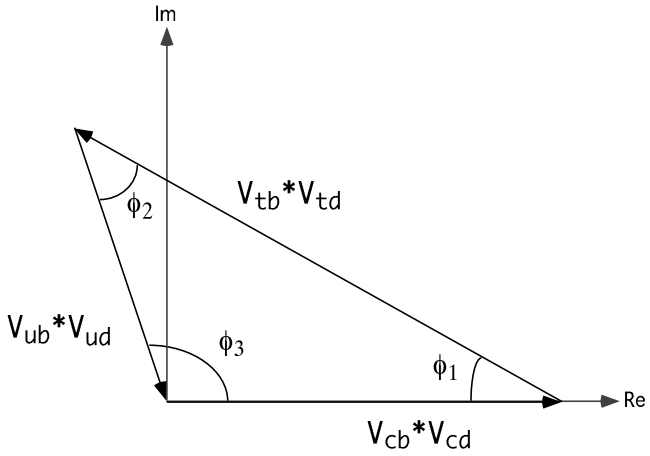


図 1.2: ユニタリティ三角形

して、実際にこの三角形が閉じていること ($\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \pi$ であること) が示されれば小林·益川模型を検証したことになる。

各辺の長さは $B$ 中間子の研究から求めることが出来る。例えば $V_{ub}$、$V_{cb}$ は $b$ クォークの崩壊幅から、三つの内角 $\phi_1 = arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right)$、$\phi_2 = arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right)$、$\phi_2 = arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*}\right)$ についても $B$ 中間子の崩壊における CP の非対称性の測定から求められる。また、$B$ 中間子の CP 非保存は他の $K$、$D$ 中間子にに比べて二桁ほど大きい。そこで、大量の $B$ 中間子を作り出してその崩壊における CP 非対称性を調べようとする $B$ ファクトリーが計画されたのである。

## 1.3 $B$ 中間子系での CP 非保存とその測定

$B^0$ と $\overline{B^0}$ は、それぞれボトム数 +1 と -1 を持つ。$B^0$ と $\overline{B^0}$ 混合は、ボトム数を 2 だけ変える、高次の弱い相互作用において起こる。ダイアグラムを図 1.3 に示す。

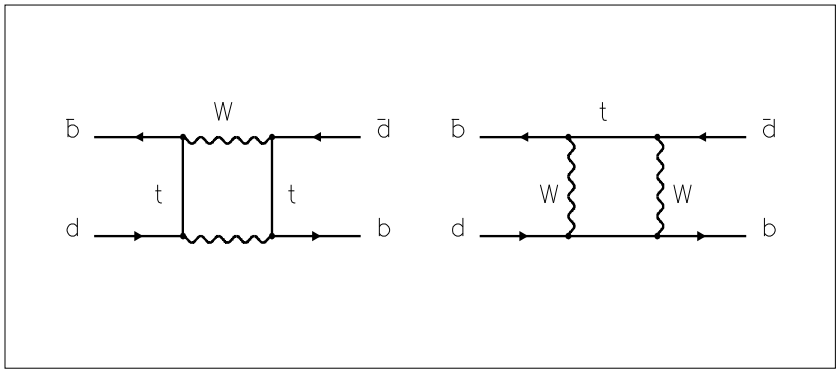


図 1.3: $B\overline{B}$ 混合のボックスダイアグラム

$B$ 中間子が $B^0$ と $\overline{B^0}$ のどちらであったかは、準レプトン崩壊の生成物を観測することによってわかる。

$$B^0 \to l^+ X$$

$$\overline{B^0} \to l^- X$$

$B$ 中間子は混合により $B\overline{B}$ 間を振動するが、一方が $B$ の瞬間はもう一方が必ず $\overline{B}$ になっているので、上の式から、一方が崩壊した瞬間にもう一方が $B$、$\overline{B}$ のどちらであったかということも判る。そこで、この瞬間を $t = 0$ として、崩壊確率を測定する。

### 1.3.1 $B^0 - \overline{B^0}$ 混合

$t = 0$ で 100% $B^0$ 状態であったものが、時間とともに変化して、時刻 $t$ において $B^0$ である確率と $\overline{B^0}$ である確率はそれぞれ、

$$I(B^0) = \frac{1}{4}[e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} + 2e^{-\Gamma t} cos\Delta m t]$$

$$I(\overline{B^0}) = \frac{1}{4}[e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} - 2e^{-\Gamma t} cos\Delta m t]$$

ここで、$\Gamma = (\Gamma_1 + \Gamma_2)/2$ とおいている。これら二式を積分して比較する。

$$N(B^0) = \int_0^\infty I(B^0) dt = \frac{1}{4}\left[\frac{1}{\Gamma_1} + \frac{1}{\Gamma_2} + \frac{2\Gamma}{\Gamma^2 + (\Delta m)^2}\right]$$

$$N(\overline{B^0}) = \int_0^\infty I(\overline{B^0})dt = \frac{1}{4}\left[\frac{1}{\Gamma_1} + \frac{1}{\Gamma_2} + \frac{2\Gamma}{\Gamma^2 - (\Delta m)^2}\right]$$

ここで、$B^0$ と $\overline{B^0}$ の数の比をとると、

$$r = \frac{N(\overline{B^0})}{N(B^0)} = \frac{(\Delta m)^2 + \left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right)^2}{2\Gamma^2 + (\Delta m)^2 - \left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right)}$$

となる。標準理論が示唆するように、$\Delta\Gamma \sim 0$ をとり、質量差 $\Delta m$ と平均の崩壊幅 $\Gamma = (\Gamma_1 + \Gamma_2)/2$ の比を

$$x = \frac{\Delta m}{\Gamma}$$

とおくと、パラメータ $r$ は簡単な形で書けるようになり、

$$r = \frac{x^2}{2 + x^2}$$

と表される。$r = 0$ で $B^0$–$\overline{B^0}$ の混合はなく、$r = 1$ で完全混合となる。

標準理論では、図 1.3 のグラフを計算して、

$$x_d \propto |V_{td}^* V_{tb}|^2$$

$$x_s \propto |V_{ts}^* V_{tb}|^2$$

であることがわかる。したがって、$x_s$ と $x_d$ を実験で測定し、その比を用いて

$$\frac{x_s}{x_d} = |\frac{V_{ts}}{V_{td}}|^2$$

の関係から、小林·益川の行列要素 $V_{ts}/V_{td}$ を求めることができる。

### 1.3.2 $B$ 中間子の崩壊における CP 非対称

$B^0$ – $\overline{B^0}$ 混合による、CP 固有状態への崩壊における CP 非保存は、非常に大きな非対称が期待される。

一般に、CP 非保存を観測するには、その反応が二つの振幅を持ち、それらが干渉することが必要である。$B$ が CP の固有状態 f に崩壊する振幅と、$B$ が混合により $\overline{B}$ に変わって f に崩壊する振幅との間に干渉が生じ、これが観測可能な量となる。

今、$f$ を CP の固有状態とすると、$\overline{f} = \pm f$ であって、$B^0$、$\overline{B^0}$ とも $f$ に崩壊できる。$B^0$ と $\overline{B^0}$ の間には混合があるので、状態は時間とともに振動する。時刻 $t = 0$ で $B^0$、$\overline{B^0}$ であったものは時刻 $t$ でそれぞれ、

$$|B^0(t)>=a_+(t)|B^0>+\eta_B e^{i\phi_M}a_-|\overline{B^0}>$$

$$|\overline{B^0}(t)>=\eta_B^{-1}e^{-i\phi_M}a_-|B^0>+a_+|\overline{B^0}>$$

となる。ここで $\phi_M$ は混合の位相、$a_\pm$ は $\Delta\mu=\Delta m-i\Delta\Gamma/2$ として

$$a_\pm=e^{-imt}e^{-\frac{\Gamma}{2}t}\cdot\begin{cases} cos\left(\frac{\Delta\mu}{2}t\right) \\ i\cdot sim\left(\frac{\Delta\mu}{2}t\right)\end{cases}$$

である。ただし、$\Delta\mu\sim\Delta m$、$\eta_B=1$ の近似を用いることができる。

ここで、もう一つパラメータを導入する。

$$\frac{A(\overline{B}\to f)}{A(B\to f)}=\pm\rho e^{i\phi_D}$$

$\rho$ は二つの振幅の比の実数部分で、$\phi_D$ が位相部分である。

$B^0(\overline{B^0}\to f$ の崩壊が、ただひとつの弱い相互作用振幅に支配される場合、$\rho=1$ となり、最初 $B^0$、$\overline{B^0}$ としてつくられた $B$ 中間子は時間とともに

$$\Gamma(B^0(t)\to f)=\Gamma(B^0\to f)e^{-\Gamma t}1+\alpha_f sim\Delta mt$$

$$\Gamma(\overline{B^0}(t)\to f)=\Gamma(\overline{B^0}\to f)e^{-\Gamma t}1-\alpha_f sim\Delta mt$$

と変化する。$\alpha_f$ は CP を破る位相と次のような関係にある。

$$\alpha_f=-(\pm)sim[\phi_M+\phi_D]$$

カッコ内の符号は $\overline{f}=\pm f$ に対応する。

$B$ 中間子の崩壊において、相棒のクォークが何ら影響を与えないとすると、これは単にボトムクォークの自由な崩壊になって、$B^0$ と $\overline{B^0}$ の崩壊振幅の比は、小林・益川の行列要素を使って、

$$\frac{A(\overline{B^0}\to f)}{A(B^0)\to f}=(\pm)\frac{V_{q'b}V_{q'q}^*}{V_{q'b}^*V_{q'q}}$$

と表される。ここで、$q\prime=(u,c)$、$q=(d,s)$ である。ヴォルフェンシュタインの表示では、$V_{q'q}$ には位相がないので、$V_{ub}=|V_{ub}|e^{-i\delta}$ とすると、$\phi_D$ はボトムクォークの崩壊モードにしたがって、

$$\phi_D=\begin{cases} -2\delta & b\to u\text{変換の場合} \\ 0 & b\to c\text{変換の場合}\end{cases}$$

となることがわかる。混合の位相 $\phi_M$ は、上述のボックスダイアグラム ( 1.3) でトップクォークがもっとも大きな寄与を与えることから、$V_{td} = |V_{td}|e^{-i\phi}$ として、

$$\phi_M = \begin{cases} -2\phi & B_d\text{中間子の場合} \\ 0 & B_s\text{中間子の場合} \end{cases}$$

となることがわかる。これで求まる角度 $\phi$、$\delta$ は、ユニタリティ三角形の $\phi_1$、$\phi_3$ に対応するものである。

## 1.4 $B$ 中間子の生成

### 1.4.1 $\Upsilon(4S)$

$\Upsilon(4S)$ はボトムクォークと反ボトムクォークの 4 番目の共鳴状態である。ボトムクォークの最初の発見は、1977 年、フェルミ研究所においてである。この実験は、400GeV 陽子と原子核の衝突による $\mu$ 粒子対の生成で、その質量のプロットから三つの共鳴状態、$\Upsilon$ が確認された。これは後に、コーネル大学の電子·陽電子型加速器 CESR での実験 CLEO によって詳しく調べられ、四つの共鳴状態が確認されている。これらの共鳴状態は、ボトム量子数を保存しつつハドロンに崩壊するが、はじめの三つの $\Upsilon$ は崩壊幅は 0.3GeV と極端に小さい。$\Upsilon(4S)$ だけが比較的大きい 20MeV の幅をもって、$b$ を含むもっとも軽いハドロンである $B$ 中間子対に崩壊する。これは、$B$ 中間子の質量が $M_{\Upsilon(3s)}/2$ と $M_{\Upsilon(4s)}/2$ の間にあることを意味する。CLEO グループは、$D$ 中間子を含むいくつかの崩壊モードを使って $B$ 中間子の質量を測定した。$B^{\pm}$、$B^0$、$\overline{B^0}$ の質量平均値として、

$$M_B = 5272.3 \pm 1.5 \pm 2.0 MeV/c^2$$

が得られている。

### 1.4.2 走る $B$ 中間子

大量の $B$ 中間子を生成する $B$- ファクトリーでは、電子·陽電子型加速器のエネルギーを $\Upsilon(4S)$ の質量に設定する。$\Upsilon(4S)$ はほぼ 100% $B$ 中間子対に崩壊する。しかし、$B$ 中間子の寿命は非常に短く ($\sim$ $2ps$ $\sim$ $17\mu m$)、ほとんど静止した状態で崩壊してしまうため、精密な位置の測定は非常に困難である。だが $B$ 中間子を高速で走らせれば、ローレンズブーストにより寿命が延び、測定が可能となる。重心系のエネルギーが $\Upsilon(4S)$ の静止質量となるように、かつ運動量保存則から $B$ 中間

子に大きな運動量を与えられるように、電子·陽電子のエネルギーを設定すればよい。KEK の $B$ ファクトリーでは、$B$ 中間子の飛行距離が $\sim 150\mu m$ となるように設定される。

第二章では KEK での $B$ ファクトリー実験について詳しく説明する。

# 第 2 章

# KEK-$B$ ファクトリー

$B$ ファクトリーとはその名の通り「$B$ の工場」、つまりは大量の $B$ 中間子を生成してその物理を調べる実験であり、現在、米国スタンフォード線形加速器センターおよび、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）において、その準備が進められている。KEK では、1994 年に BELLE collabration が組織され、1998 年秋の実験開始を目指して現在も準備が進行中である。

先のトリスタン実験で作られた直径 1km· 円周 3km の円形加速器用のトンネル内に、$B$ ファクトリー用の非対称エネルギー加速器である KEKB 加速器が建設されつつある。

また、KEKB 加速器で生まれる様々の粒子を捕える BELLE 検出器も、完成まであとひと息である。

この章では、KEKB 加速器、BELLE 検出器について詳しく見ていきたい。

## 2.1 KEKB 加速器

KEKB 加速器は、8GeV の電子と 3.5GeV の陽電子を衝突させる非対称エネルギー· 2 リング型電子陽電子衝突型加速器である。

その目指すルミノシティ（ビーム強度）は $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ と非常に高く、これはトリスタンの 250 倍、現在世界最高を誇る CESR の 50 倍である。

### 2.1.1 非対称衝突型加速器

$\Upsilon(4S)$ は、$b$ クォークと $\overline{b}$ クォークの 4 番目の共鳴状態であり、ほぼ 100% の割合で、$B\overline{B}$ 対に崩壊する。KEKB で加速される電子・陽電子のエネルギーは、重

心系でこの $\Upsilon(4S)$ の質量 $(= 10.58GeV)$ となるような値に設定される。

また、$B$ 中間子は、測定可能な寿命を持たせるために、ローレンツブーストさせる必要がある。$\Upsilon(4S)$ に十分な運動量を与え、走らせるわけである。それは非対称のエネルギーで電子と陽電子を衝突させることによって可能となる。この二つの要求を満たすエネルギー値が、電子 8GeV· 陽電子 3.5GeV である。(重心系でのエネルギーは $E^* = 2\sqrt{E_{e^-}E_{e^+}}$ で与えられる。)

トリスタンの様な対象エネルギーの衝突器では、一つのリングで同時に電子·陽電子をお互い逆方向に周回させ、加速することが可能であるが、KEKB は非対称なのでリングを二つ用意する必要がある。二つのリングは二箇所で交差し、うち一箇所が衝突点、つまり BELLE 検出器のおかれる場所である。

線形加速器で最終エネルギーまで加速した電子、陽電子ビームは効率をあげるため、中間加速器経由せずに直接主リングに入射される。衝突点ではバンチを強く圧縮して交差させる。

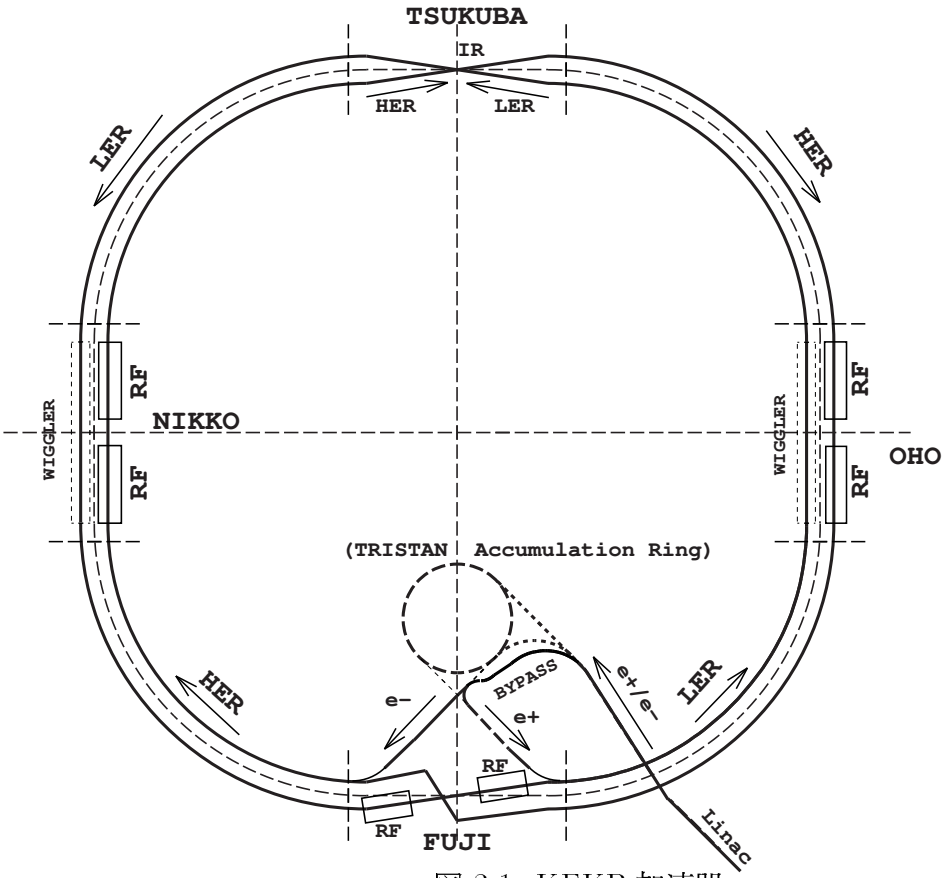


図 2.1: KEKB 加速器

### 2.1.2 ルミノシティ

ルミノシティとはビームの強度を表す量である。ルミノシティ L は、断面積 $\sigma$ を持つ反応の発生頻度 $R$ が $R = \mathcal{L}\sigma$ となる様に定義される。$B$ 中間子が本実験で興味ある特定のモードに崩壊する確率は非常に低く、$10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度である。ゆえに、興味ある事象の数を十分稼ぐにはルミノシティを非常に高くすることが必要となるのである。

衝突型加速器において、ルミノシティは次式で与えられる。

$$\mathcal{L} = 2.2 \times 10^{34} \xi (1 + r) \left( \frac{E \cdot I}{\beta_y^*} \right)_{\pm}$$

ここで、

$E$ : ビームのエネルギー [GeV]
$I$ : 蓄積電流 [A]
$\xi$ : ヒームビームチューンシフト (衝突時に働く、ビームビーム力の強さ)
$r$ : 衝突点における垂直方向のビームサイズを水平方向のビームサイズで割った値
$\beta_y^*$ : 衝突点で垂直方向にどれだけビームを絞るかを表すパラメータ

である。

この式からわかるように、L を大きくするには電流 $I$ を大きくし、ビームサイズ $\beta_y^*$ を小さくする必要がある。KEKB の目指すルミノシティを達成するためには、電子リングで $1.1A$、陽電子リングで $2.6A$ という大電流を蓄積しなければならない。電子・陽電子衝突型加速器においては、電子や陽電子が数千億個集まって出来るバンチと呼ばれるかたまりが、リング中を周回する。一つのバンチが担うことの出来る電流は数 $mA$ 程度なので、KEKB では $60cm$ 間隔で約 5000 個のバンチをリング中に蓄積させることになる。

## 2.2 BELLE 検出器

### 2.2.1 全体の構造

BELLE 検出器のもっとも重要な目的は、$B$ 中間子における CP の破れの測定である。そのためには、電子・陽電子の衝突によって生まれた様々な粒子の崩壊点および粒子の種類を精密に測定する必要がある。また、本実験では発生粒子のエネル

ギーが比較的低いため、物質による吸収や多重散乱を避けるよう、検出器の物質量は出来る限り押さえることが重要である。

ある特定の目的を持った検出器が層構造になって、BELLE という一つの検出器をなす。BELLE 検出器の全体図を図 2.2、2.3 に示す。非対称エネルギーでの衝突実験であるので、検出器も非対称に作られる。

それぞれの目的とそれを果たす検出器を、ビームパイプに近いものから順に表 2.1 に示す。

表 2.1: 各々の目的

| 目的 | 検出器名 |
|---|---|
| $B$ 中間子崩壊点の検出 | シリコンバーテックス検出器 (SVD) |
| ルミノシティモニター | 超前方カロリメータ (EFC) |
| 荷電粒子の飛跡測定 | 中央ドリフトチェンバー (CDC) |
| 粒子識別 | エアロジェルチェレンコフカウンター (ACC)<br>飛行時間測定器 (TOF/TSC) |
| 電磁相互作用によるエネルギー測定 | CsI 電磁カロリメータ (ECL) |
| $K_L$ 粒子と $\mu$ 粒子の検出 | $K_L, \mu$ 検出器 (KLM) |

以下、各々の検出器について簡単に説明する。なお、CsI 電磁カロリメータについては 4 章で詳しく述べることにして、ここでは触れない。

### 2.2.2 各部の構成

#### シリコンバーテックス検出器 (Silicon Vertex Detector)

半導体検出器の一種であり、$B$ 中間子の崩壊点を検出する。そのため、非常に精度の良い、高い位置分解能が要求される。

検出器はビームパイプのすぐ外側に置かれ、全体は三層のレイヤーからなる。各層には両面シリコンマイクロストリップ検出器（DSSD）が内側から順に 8,10,14 枚配置される。一枚の DSSD には z 方向、r$-\phi$ 方向のマイクロストリップが二つの面に各々はられる。読み出しは VA 1 チップで行う。

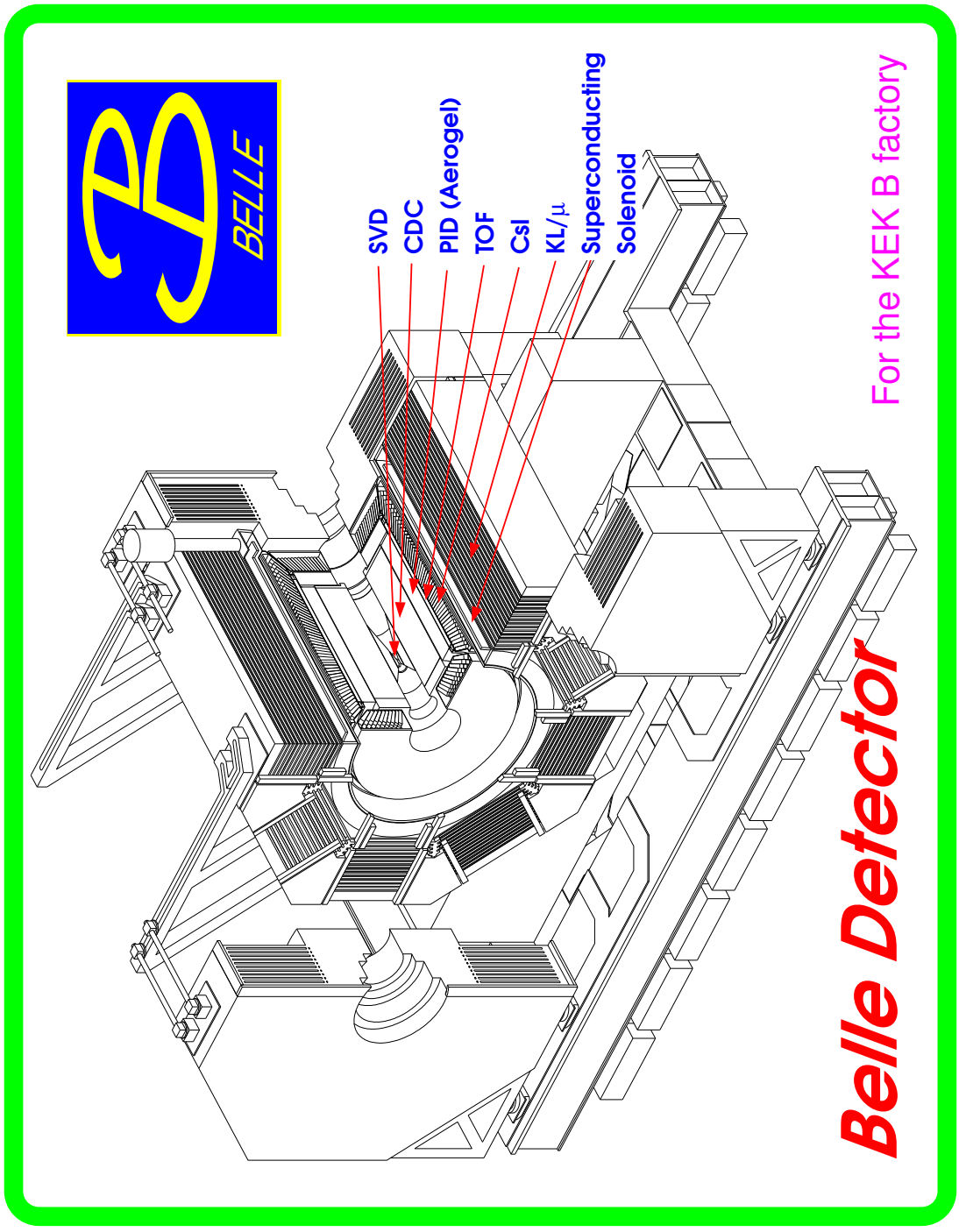


図 2.2: BELLE 検出器

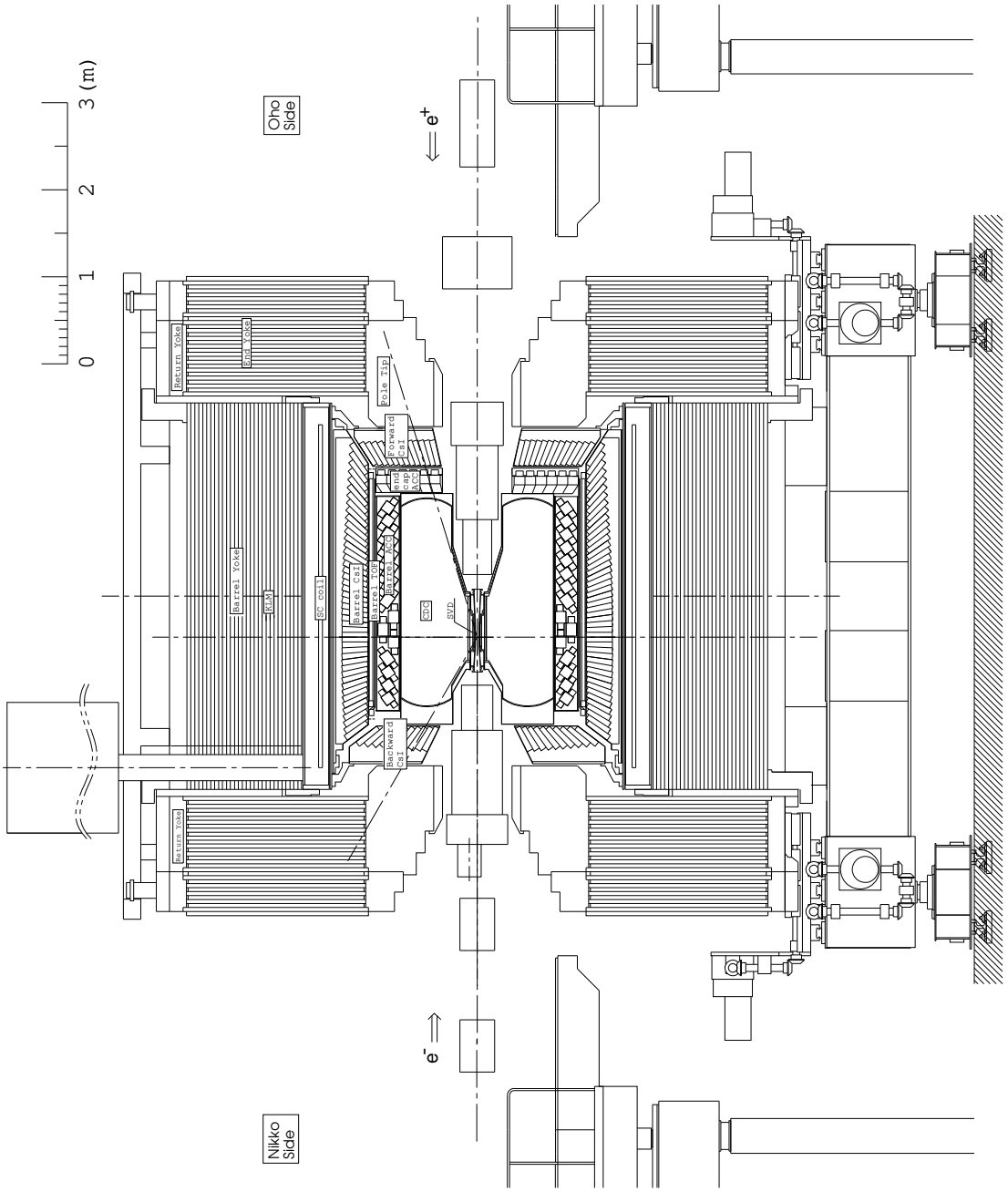


図 2.3: BELLE 検出器側面図

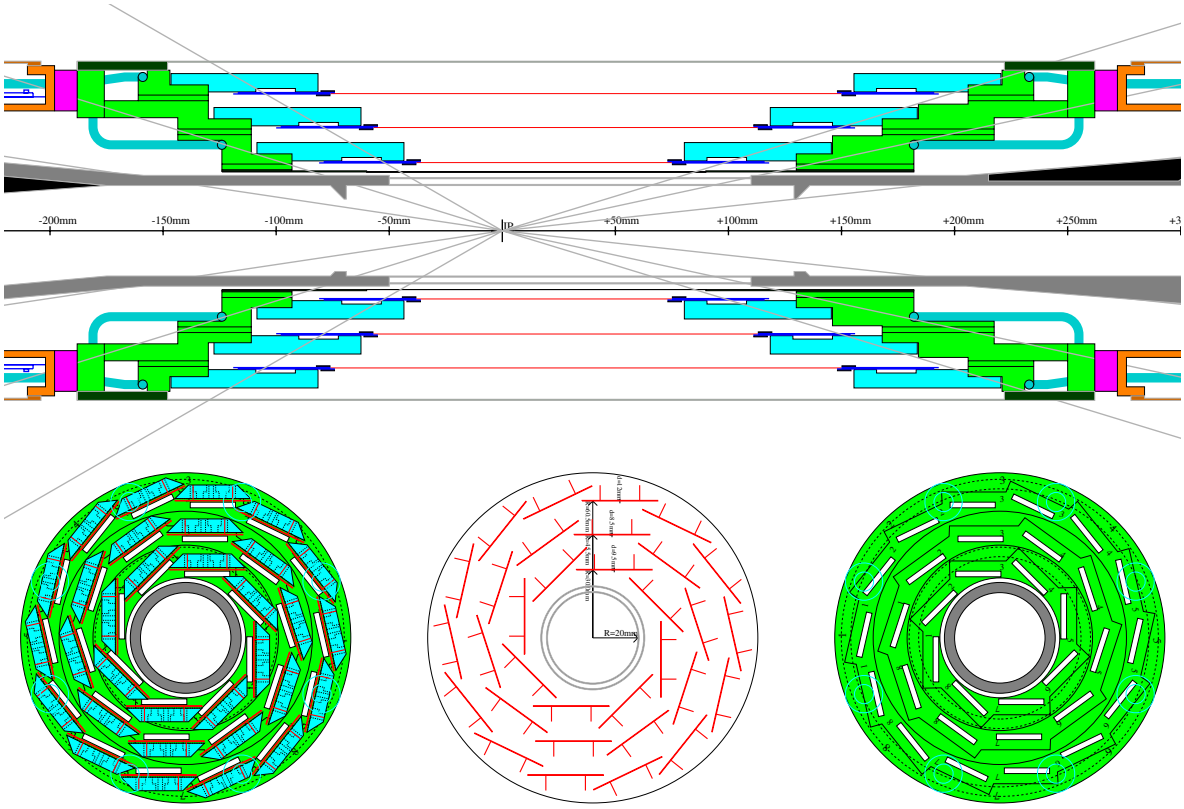


図 2.4: Silicon Vertex Detector

**超前方カロリメータ (Extreme Forward Calorimeter)**

BGO として知られる $Bi_4Ge_3O_{12}$ 結晶を用いた、電磁カロリメータである。CsI 電磁カロリメータでカバー出来ない領域のためにおかれる。電磁シャワーによるエネルギーの測定だけでなく、minimum ionization を起こした荷電粒子の検出も行う。EFC からのデータの一部は、独自のデータ収集システムでオンラインのルミノシティモニター用に使われる。

EFC は、前方・後方ともそれぞれ $\theta$ 方向に 5 層、$\phi$ 方向に 32 分割で計 160 個の結晶をもち、前方で $6.2^\circ < \theta < 11.6^\circ$、後方で $8.5^\circ < \theta < 16.9^\circ$ の領域をカバーする。各結晶のサイズは $2\times2cm^2\times$前方用$13.5cm$（後方用$11.8cm$）、衝突点からの距離は前方 75cm、後方 58cm である。各カウンターの読み出しは、結晶にエコボンドで接着されたフォトダイオード、低ノイズ電荷型プレアンプを用いて行われる。

エネルギー分解能は、0.5~8GeV で $\sigma(E)/E = 2.5 \sim 3.5\%$、位置分解能は $\sigma(\theta) = 0.2^\circ \sim 1^\circ$、$\sigma(\phi) = 0.3^\circ$ を達成出来ることがシミュレーションにより確かめられている [8]。

**中央ドリフトチェンバー (Central Drift Chember)**

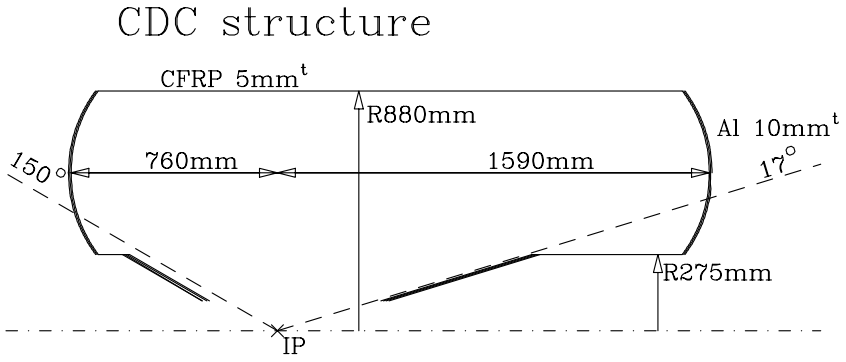


図 2.5: Central Drift Chember

多線式ドリフトチェンバーである CDC は、荷電粒子の飛跡測定による、精度の高い運動量測定、ガス中でのエネルギー損失 dE/dx の測定による粒子識別を行う。

検出器内には無数のワイヤーが張り巡らされる。陽極となる直径 $30\mu m$ の金メッキタングステン製アノードワイヤー、ドリフト電場形成のための陰極となる直径 $126\mu m$ のアルミニウム製フィールドワイヤーをもってセルを構成する。$\phi$ 方向に一周分の

セルをレイヤーと呼ぶ。CDC はその形から三つの部分に分けられ、内側から順にそれぞれカソードパート・インナーパート・メインパートと呼ばれる。全体は 11 層のスーパーレイヤー構造になっていて、各スーパーレイヤーには 3∼5 層のレイヤーがある。カソードパートには、合計 3 層のカソードレイヤーがあり、各レイヤーには、ポリエチレンにアルミニウムをエッチングして作られた $12\mu m$ 厚さ・幅 6.8∼7.1mm のカソードストリップが z 軸方向に 0.9mm 間隔で貼られる。$\phi$ 方向には 8 分割されている。

検出器内にはヘリウム 50% ・エタン 50% の混合ガスが充填される。荷電粒子は検出器を通過する際まわりのガスを電離し、ここで出された電子がアノードワイヤーまでドリフトする。その時に電子なだれを起こさせることによってガス増幅させ、それを信号として検出し、これでエネルギー損失の測定を行う。さらに、ドリフト時間を測定することによって、$r-\phi$ 方向の位置を検出する。また、カソードストリップはアノードワイヤーのどの位置でガス増幅が起きたかを検出することが出来るので、z 軸方向の精密な位置測定を行える。

CDC は 1.5T の磁場中に置かれるので、荷電粒子は螺旋運動を行う。その飛跡から運動量測定を行う。

CDC の時間分解能は $P_t \geq 100MeV/c$ の荷電粒子に対して、$\sigma(P_t)/P_t = 0.5\%\sqrt{1+P_t^2}Z$、エネルギー損失に対する精度は $\sigma(dE/dx)/(dE/dx) = 5\%$ である。

### エアロジェルチェレンコフカウンター (Aerogel Čerenkov Counter)

(Aerogel Čerenkov Counter)

シリカエアロジェルを用いた、敷居値型チェレンコフカウンターである。荷電粒子が物質中で、光の伝播速度よりも速く運動するとチェレンコフ光が放射される。これを検出することにより、0.8∼3.5GeV/c の運動量領域での $\pi$、$K$ 中間子の識別を行う。全体はバレル部と前方エンドキャップ部から成る。

バレル部は $\phi$方向60$\times$$z$方向16、計 960 個のカウンター、前方エンドキャップには同心円状に 5 層で計 228 個のカウンターが配置される。各カウンターは厚さ 0.2mm のアルミニウム製ボックス内にシリカエアロジェルが入れられる。シリカエアロジェルは KEK で BELLE 実験用に開発されたもので、そのサイズはバレル用で $12\times12\times12\mathrm{cm}^3$、エンドキャップ用のもので前面 $11\times12\mathrm{cm}^2\times$ 厚さ 13cm となっている。カウンターボックスの内表面は、より良い集光効率と一様なレスポンスを得るために白色ゴアテックスシートで覆われる。ACC は 1.5T の磁場中におかれるので、信号の読み出しには磁場に強く、位置の検出に優れた近接メッシュ型光電子増倍管が用いられる。

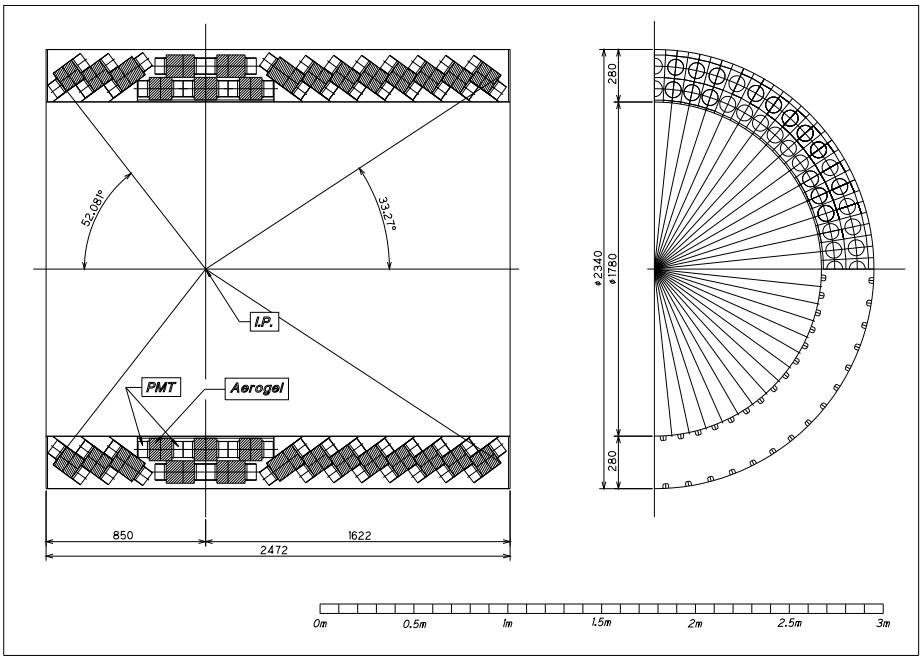


図 2.6: Aerogel Čerenkov Counter

バレル部のカウンターは、$B$ 中間子の 2 体崩壊の運動学的限界である 2.5~3.5GeV/c までの領域をカバーするように、偏角 $\theta$ によって、エアロジェルの屈折率が 1.01~1.02 の範囲に設定される。エンドキャップ部には屈折率 1.03 のエアロジェルが用いられ、CDC による dE/dx の情報と合わせることによって 0.8~2.5GeV/c 領域のフレーバータギングを行う。ACC は、これらの領域において $3\sigma$ の $\pi/K$ 分離を実現している [9]。

### 飛行時間測定器 (Time of Fright)

$B$ 中間子のフレーバータギングのために、1.2GeV/c 以下の運動量領域での $\pi/K$ の識別を行う。また、トリガー信号として使われるためのタイミング信号を出す。

64 個の TOF/TSC カウンターが、衝突点から半径 1.2m の場所に並べられる。各カウンターは二つの TOF カウンターと一つの TSC カウンターからなる。TOF カウンターは厚さ 40mm 幅 60mm 長さ 2550mm のプラスチックシンチレーターで、両側取り付けられた近接メッシュ型光電子増倍管で読み出しを行う。TSC カウンターは厚さ 5mm 幅 120mm 長さ 2630mm のものにライトガイドを接続し、同じく近接メッシュ型光電子増倍管を取り付け、片側だけの読み出しを行う。カウンター

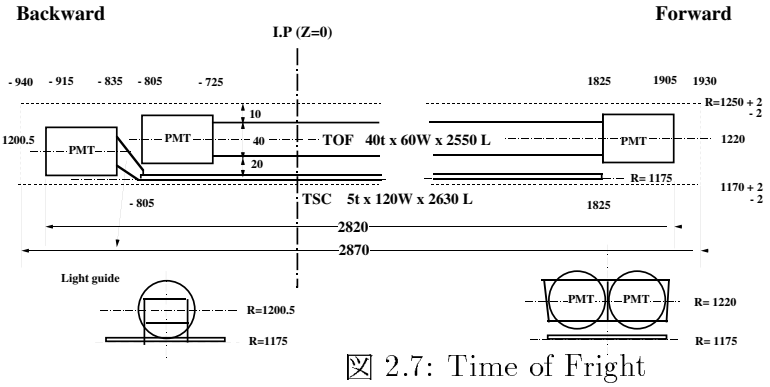

図 2.7: Time of Fright

は磁場中に置かれ、$33.7° < \theta < 120.8°$ をカバーする。

シンチレーターは、荷電粒子の通過によって落とされたエネルギーに比例した量のシンチレーション光を発生させるので、それを検出することによって、荷電粒子の運動量情報、通過した時間の情報を得る。また、時間応答が非常に速いことからタイミングを決めるものとして使われる。

TOF/TSC カウンターは、100ns の時間分解能、タイミングトリガー信号の 70kHz 以下の頻度と 5ns 以内のタイムジッターを達成している [10]。

### $K_L$,$\mu$ 粒子検出器 ($K_L, \mu$ detecter)

$K_L$ 中間子と $\mu$ 粒子の識別を目的とするこの検出器は、検出器の一番外側に置かれる。

検出器はバレル部と前方・後方両エンドキャップ部に分かれる。バレル部（エンドキャップ部）は、八つの辺を持ち、厚さ 44mm15 層 (14 層) のスロットを挟む形で厚さ 47mm の鉄板が並べられる。各スロットにはレジスティブプレートカウンター (RPC) が挿入される。厚さ 2mm のガラス板 2 枚の間に、2mm 厚のプラスチックを挿入して空間を作り、そこにガス (Ar25%,$C_4H_1$025%,$CH_2FCF_2$) を充填し、これを一つの RPC レイヤーとする。各 RPC モジュールは、この RPC レイヤー 2 層からなり、バレルには方形の RPC モジュール二つを各スロットに置くので $2 \times 8$辺 $\times$ 15層 の計 240 のモジュールになる。エンドキャップ部は 1/4 円形のモジュール $\times$14 層で、両方合わせて 112 のモジュール数となる。

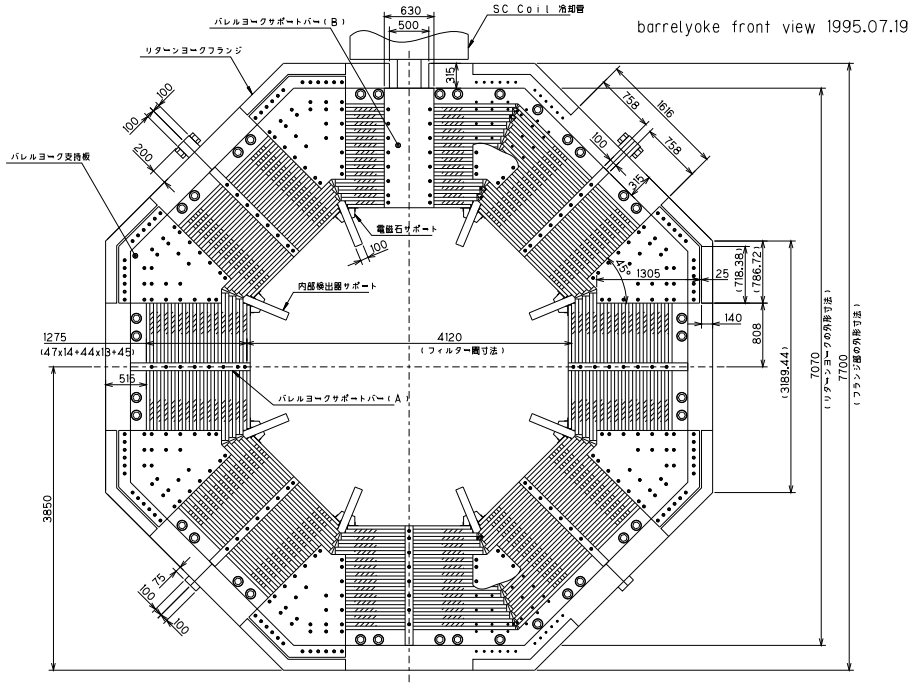


図 2.8: $K_L, \mu$ detecter

RPC は二次元スパークカウンターである。入射荷電粒子によって電子なだれが誘導され、高抵抗の電極内の電荷が限界まで放出された時にそのなだれが消滅する。プレートの抵抗物質を通して電極内が再び充電されるまで、RPC の電場が局所的に弱まる。高抵抗の高電圧電極はこの一次的な電場の弱まりによる、速い (幅 20ns) イメージ信号を効果的に透過し、外側にある電極がこの信号を検出する。

読み出しは、エンドキャップ部は各モジュールにつき $\theta$ 方向 48、$\phi$ 方向 96 本のストリップ、バレルは総数 21,856 本のストリップを通して行われる。

$K_L$ 中間子は、CsI カロリメータ、ソレノイド、クライオスタット、そして KLM とハドロン相互作用を起こして荷電粒子を生成するので、KLM はそれをタグする。$\pi$、$K$ 中間子はこの相互作用で減衰し、さらに KLM の物質に吸収される。$\mu$ は透過力が非常に強いこと、あまり方向を変えずに飛んでくることなどから、他の荷電粒子と容易に区別できる。CP にセンシティブな崩壊モード、$B \rightarrow J/\Psi K^0_L$ からやってくる $K_L$ は、KLM において 1.1~2.6GeV/c という高いエネルギーで捉えられるので、これをもって他の大量のバックグラウンドの $K$ や光子を抑える。

KLM は $25° < \theta < 145°$ をカバーし、エネルギーの高い $\mu$ 粒子についてはレンジはさらに広くなり、$17° < \theta < 158°$ まで検出可能である。

# 第 3 章

# BELLE 検出器におけるトリガーシステム

検出器の中では様々な事象が発生する。電子と陽電子の衝突による粒子の生成だけでなく、宇宙線からによるバックグラウンド、ビームのバックグラウンドなどがあげられ、事象の大半がこのバックグラウンドである。その中から物理的に興味ある事象を適した頻度で取り出すため、全ての事象を「ふるい」にかける必要がある。その「ふるい」の役割をするのがトリガーである。

## 3.1 事象と頻度

トリガーシステムを考えるにあたっては、判断の対象となる物理事象とその頻度、および一事象当たりのデータ量と計算機で読み出しの行える速度を検討することが重要である。

ビーム中には加速器一周分に電子·陽電子それぞれ 5000 個のバンチがある。これらのバンチは、BELLE 検出器の置かれる地点で 2nsec に一回、交差する。即ち、1 秒間に $5 \times 10^8$ 回 (500MHz) の交差頻度である。

しかし、このうち実際に電子・陽電子が衝突して反応を起こす頻度は交差回数に比べて非常に小さく、表 3.1 に示すように 1kHz 以下である。

衝突による事象を大まかに分類すると、次のものが挙げられる。以下、主な衝突事象について簡単に説明する。

- $e^+e^- \longrightarrow \Upsilon(4S) \longrightarrow B\overline{B}$

  電子·陽電子の衝突により、$b\overline{b}$ の 4 番目の共鳴状態 $\Upsilon(4S)$ が生成され、$B\overline{B}$ 対に崩壊する。1 章で説明した通り、これこそが我々の求める CP の破れを知るための事象である。

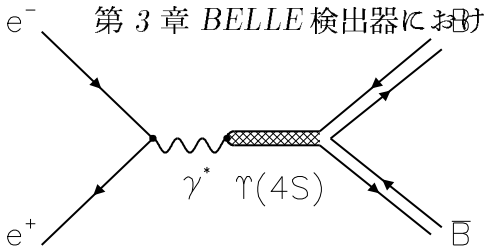


図 3.1: $B\overline{B}$ 対生成

- $e^+e^- \longrightarrow q\overline{q} \longrightarrow Hadrons$

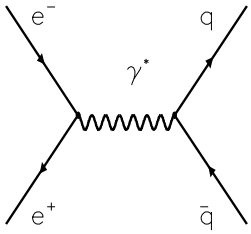


図 3.2: コンティニューム

電子・陽電子の衝突によってクォーク・反クォーク対が生成され、それがハドロンに崩壊する過程である。この過程は、上記の" 共鳴 (resonance)" 過程に対して" コンティニューム (continuumu)" 過程と呼ばれる。断面積は、$\Upsilon(4S)$ を経由する過程のほぼ 2 倍である。

$$\sigma = \frac{87nb}{s}\sum_q e_q^2 \times 3, \sqrt{s}\text{は重心系のエネルギー}$$

- $e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$

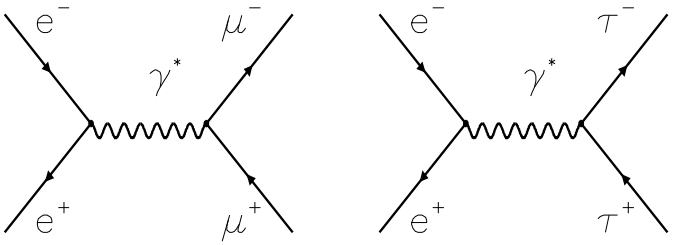


図 3.3: レプトン対生成

電子・陽電子の衝突から、レプトン対が生成される過程である。特に、$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 過程を使っての $\tau$ 粒子の詳しい研究も可能である。

- $e^+e^- \longrightarrow e^+e^-$

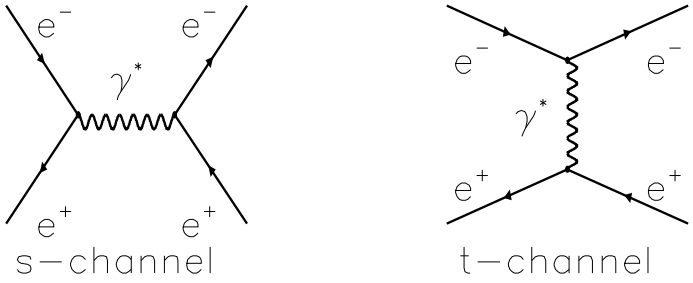


図 3.4: Bhabha 散乱

これは Bhabha 散乱と呼ばれる。電子と陽電子の相互作用から、また電子と陽電子が出てくる反応で、図 3.4 の様に $e^+e^-$ が消滅する過程と、$t-channel$ に光子が飛ぶ過程からの寄与がある。表 3.1 に示すように、Bhabha 散乱の断面積は物理的に興味のある $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\overline{B}$ 過程の 10 倍以上であるため、データ収集時に頻度を下げる必要がある。

- $e^+e^- \longrightarrow \gamma\gamma$

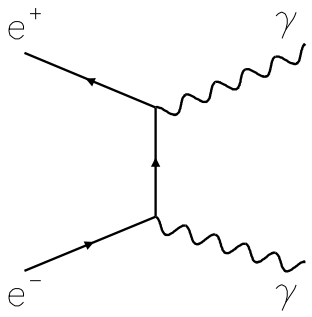


図 3.5: $\gamma\gamma$ 生成

電子・陽電子の衝突によって最終的に二つの光子が生まれる。

これらの光子や先の Bhabha 散乱の電子·陽電子は、カロリメータでとらえられエネルギー較正にも利用される。

- 2 光子過程

  2 光子過程は、電子及び陽電子から放射された光子が、光子·光子散乱する過程で、これによって光子·光子散乱の物理が研究できる

電子・陽電子の衝突によって起こる本物の物理事象の他に、実験では様々なバックグラウンドが存在する。主なバックグラウンド源は以下の三つである。

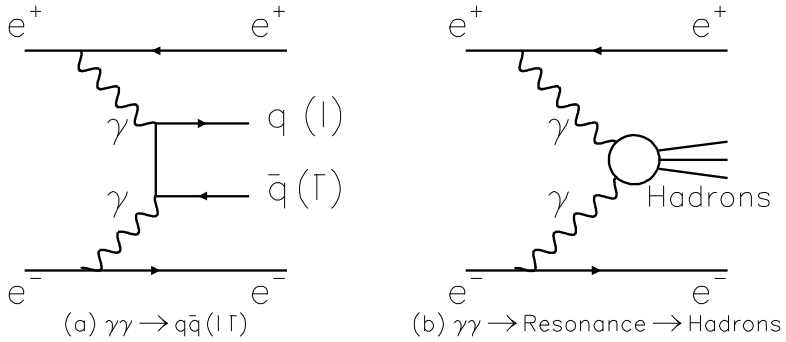


図 3.6: 2 光子過程

- 宇宙線
  宇宙から降り注いでくる宇宙線は、ほとんどが $\mu$ 粒子であり、検出器を通り抜ける際に不要な相互作用を起こしてしまう。

- ビーム・バックグラウンド
  ビームパイプ中は完全な真空ではないため、残存ガスとビームが衝突し相互作用を起こす。ここで生じる電子、光子も検出器にとらえられる。また、相互作用を起こしたためエネルギーの低くなってしまったビームの成分が、加速用の電磁石によって必要以上に曲げられビームパイプ壁と衝突し、電子や光子を叩き出してしまう。これがビーム・バックグラウンドの主な原因である。

- 電気ノイズ

それぞれの断面積と頻度を表 3.1 に記す。事象のほとんどがバックグラウンドであることがわかる。

一方、一事象毎に全ての測定器から読み出すべきデータ量は、平均で 50kbyte と予想されている。これを 1kHz の速さで読み出すとすると、データ量は 50Mbyte/sec となる。このデータ量は非常に多く、トリスタン実験のほぼ 100 倍である。このように多量のデータを高速に読み出すために、コンピュータを数十台並行させた読み出しシステムを使用する予定である。

しかし、このようなシステムでも読み出せる速度は 1kHz が限界であり、出来ればこれを 500Hz 程度に抑えたい。

つまり、500Hz 程度の頻度で読み出したい事象を選択することが、BELLE トリガーシステムの役割なのである。

表 3.1: 事象の頻度

| 物理過程 | $\sigma(nb)$ | 頻度 (Hz) |
|---|---|---|
| $\Upsilon(4S) \to BB$ | 1.2 | 12 |
| $q\overline{q}$ | 2.8 | 28 |
| $\mu^+\mu^- + \tau^+\tau^-$ | 1.6 | 16 |
| Bhabha | 44 | 440 |
| $\gamma\gamma$ | 2.4 | 24 |
| 2 光子過程 | $\sim 15$ | $\sim 150$ |
| バックグラウンド | | |
| 宇宙線 | | O(1k) |
| ビーム・バックグラウンド | | O(10k) |
| 電気ノイズ | | ?? |
| 総計 | | O(10k) |

## 3.2 トリガーの条件

具体的なトリガー条件は、「バックグラウンドは効率良く落とし」、「物理的に意味のある事象は損失することなく高い効率で検出する」という互いに相反する要求を満たすように工夫する必要がある。また、$\sim 2\mu sec$ 程度の速いタイミングでトリガー信号を出す必要があるので、条件は単純でなければならない。

物理事象の選択に使う、基本的なトリガー条件を表 3.2 に示す。

表 3.3 にしめすように、シミュレーションによる計算から、このトリガー条件で $\Upsilon(4S) \to B\overline{B}$ 事象等の検出効率は 99% 以上であることが確認されている。一方宇

表 3.2: 物理事象のトリガー条件

| | | |
|---|---|---|
| トラックトリガー | 飛跡 | 2 本以上 |
| | $P_T$ | 0.3GeV 以上 |
| | 飛跡のなす角 | 90° 以上 |
| カロリメータトリガー | 全エネルギー | 1GeV 以上 |
| | クラスター数 | 4 つ以上 |

宇宙線、ビームバックグラウンド等は 100Hz 程度にまで落とすことが可能である。

この表で、Bhabha、$\gamma\gamma$ 事象の頻度が $\frac{1}{100}$ になっているのは、カロリメータトリガーによりこの事象を特別に選びだし、トリガー頻度をそこまで下げているためである。この点については、事象で詳しく述べる。

表 3.3: トリガー後の事象頻度

| 過程 | トリガー前の頻度 (Hz) | トリガー後の頻度 (Hz) |
|---|---|---|
| $\Upsilon(4S) \to BB$ | 12 | 12 |
| $q\overline{q}$ | 28 | 28 |
| $\mu^+\mu^- + \tau^+\tau^-$ | 16 | ∼16 |
| Bhabha | 440 | 4.4 |
| $\gamma\gamma$ | 24 | 0.2 |
| 2 光子過程 | ∼ 150 | ∼ |
| バックグラウンド | | |
| 宇宙線 | O(1k) | (∼10) |
| ビーム・バックグラウンド | O(10k) | (∼100) |
| 電気ノイズ | ?? | (∼0) |
| 総計 | O(10k) | (∼200) |

ビームバックグラウンドは加速器の状態に大きく依存するため、これらの見積りにはかなりの不確定性が含まれる。しかし、トリガーの条件を少しきつくすることにより、ビームバックグラウンドはたやすく現在の案の $\frac{1}{10}$ に減らせることがわかっているので、実際の実験時にはそれで対処できるものと考えている。

## 3.3 トリガーシステムへの要求

前セクションで述べた様なトリガー条件を実際の BELLE のシステムとして実現するには、様々な要求を満たす必要がある。(1) トリガーの判断にかかる時間が $2.2\mu sec$ 以内であること (2) 事象の検出からトリガーの判定、デジタル化までは連続的・流れ作業式に行われること (3) トリガーの効率が独立に測定できる構成であること (4) 実験時の状況に応じてトリガー条件を容易に変えられること、などが挙げられる。

## 3.4 基本構想

まず、高エネルギー実験で使われている一般的なトリガー / データ収集の手法について説明する。

### 3.4.1 一般的なトリガー / データ収集方法

トリスタンのような、ビーム交差から次の交差までの時間が 5 ～ $10\mu sec$ と比較的長い衝突実験では、ビームの交差 (crossing) に合わせてトリガーの判定を始め、アナログ - デジタル変換器 (ADC) はゲートを開いて信号待ち状態になる。この時、必ずしもビームは衝突するわけではない。判定の制限時間内にトリガー条件を満たす信号が来なければそこでデジタル化は中止される — つまりゲートがクリアされる。トリガーシステムによってイベントと同定される信号が来たならば、デジタル化はそのまま続けられる。

これをゲート・クリア方法と呼ぶ。KEK-$B$ ファクトリーはビーム交差の時間が 2nsec と非常に短いため、ビームの交差毎に判定を行うこの方法は使えない。

伝統的な固定標的実験で使われる遅延・ゲート方法は、事象が発生する毎に判定を行い、トリガー条件を満たせばあらかじめ遅らせておいた信号を ADC に送りデジタル化をする、というものである。しかし、信号を遅らせるには非常に長いケーブルや高価な遅延回路が必要となり、$100nsec$ オーダーの遅延が限度である。そのため、トリガーの判定に数 $\mu$sec を要する BELLE 実験ではこの方法を使うことが出来ない。

### 3.4.2 BELLE のトリガー / データ収集方法

BELLE が選択したのは、信号を遅らせる代わりに電荷 – 時間変換器（QTC）と呼ばれる IC を使って信号の電荷情報を一旦、時間情報に変換し、TDC によってこれを読み出すという方法である。

トリガーの判断が下るまでに各検出器のほとんどの読み出しシステムでは、QTC によって出力の電荷に比例した時間信号を作り、それを TDC に送る。そこで判断を待つ。こうすることによって、信号を遅らせることなく、トリガーの判定に要する時間を稼ぐことが出来る。

トリガーシステムからの信号を合図に TDC はデジタル化を開始する。

この方法は、ビームの交差頻度やトリガー判定時間に依らず用いることが出来る。さらに、今までの技術の延長上でシステムを組むことが出来るので開発に莫大な費

用と労力をつぎこまずに済む。また各検出器の読み出しのほとんどを同一の TDC で行うことでコストダウンも図れる、と利点が多い。

## 3.5 BELLE トリガーシステム

BELLE トリガーシステムの全体図を図 3.7 に示す。

トリガーシステムは、各検出器毎のトリガーシステムが並行して存在し、その上に全体をまとめて最終的な判断をするシステムがある、という形で構成される。主なトリガー情報を出す検出器には、中央ドリフトチェンバー (CDC) と電磁カロリメータ (ECL) 及び飛行時間測定器 (TOF) がある。CDC では荷電粒子の情報を使ったトリガー信号、ECL は粒子のエネルギー情報から全エネルギートリガーや Bhabha トリガー、そして TOF は時間を決めるタイミングトリガー信号を出す。

BELLE のトリガーシステムを束ねる GDL (Global Decision Logic) には、各検出器からのトリガー信号がイベント発生より 1.85$\mu$sec までに送られるようになっている。GDL では、1.85$\mu$sec から総合判定を開始し、その判定が真であるならば 2.2$\mu$sec に各検出器の読み出しシステムへ向けて最終的なトリガー信号を出力する。各システムの TDC はその信号を受けてデジタル化を開始し、それがが終了し次第データは全体のデータ収集システムに送られる。

## 3.6 BELLE データ収集システム

各検出器から読み出されたデータは、イベントビルダーで各イベント毎のデータにまとめられ、オンラインコンピュータファームに送られる。ここでは、事象の簡単な再構成を行うことによってオフラインでの解析に用いるイベントのデータのみを選択して、データストレージ（磁気テープ）に送る（図 3.8 ）。

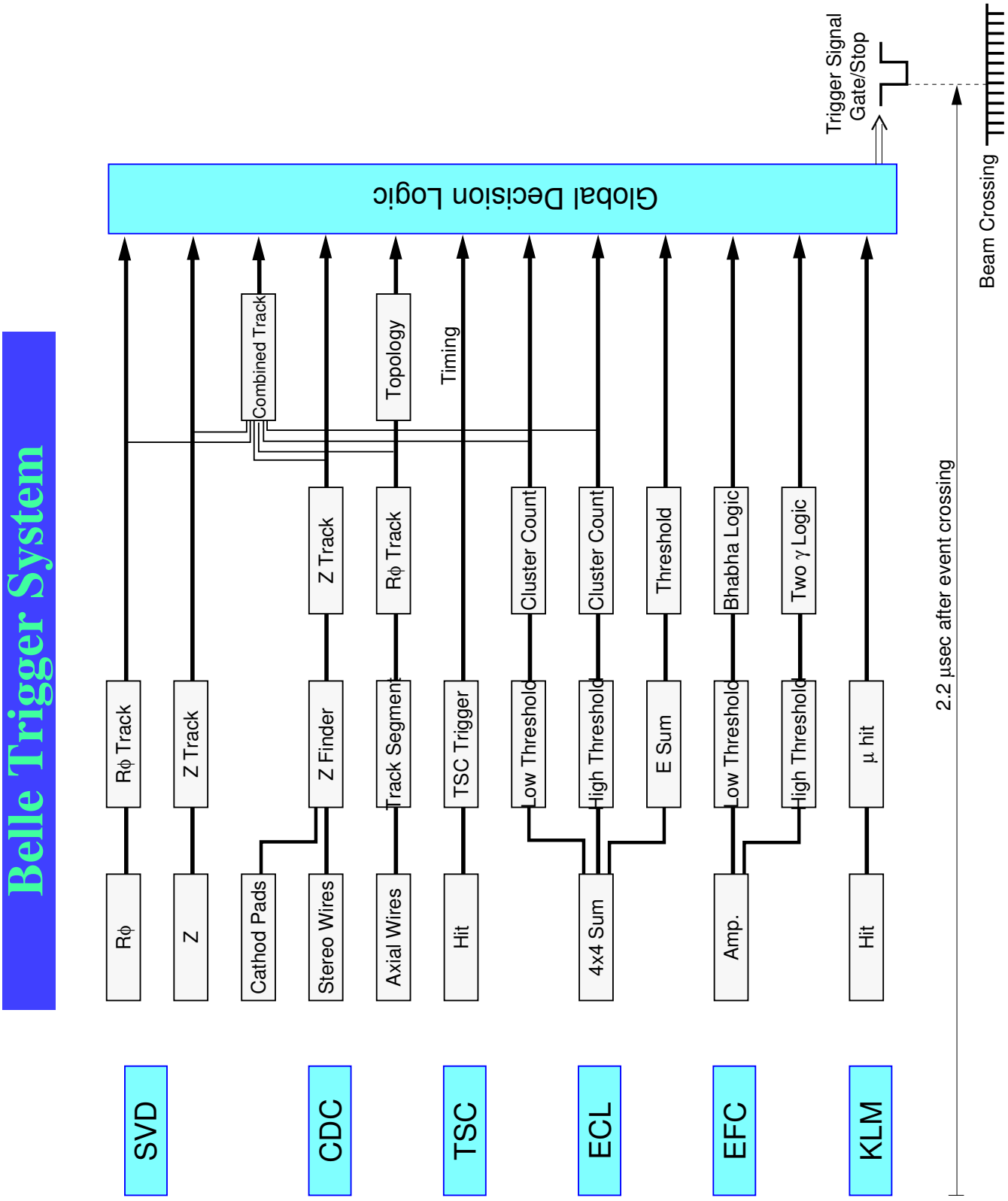


図 3.7: BELLE トリガーシステム

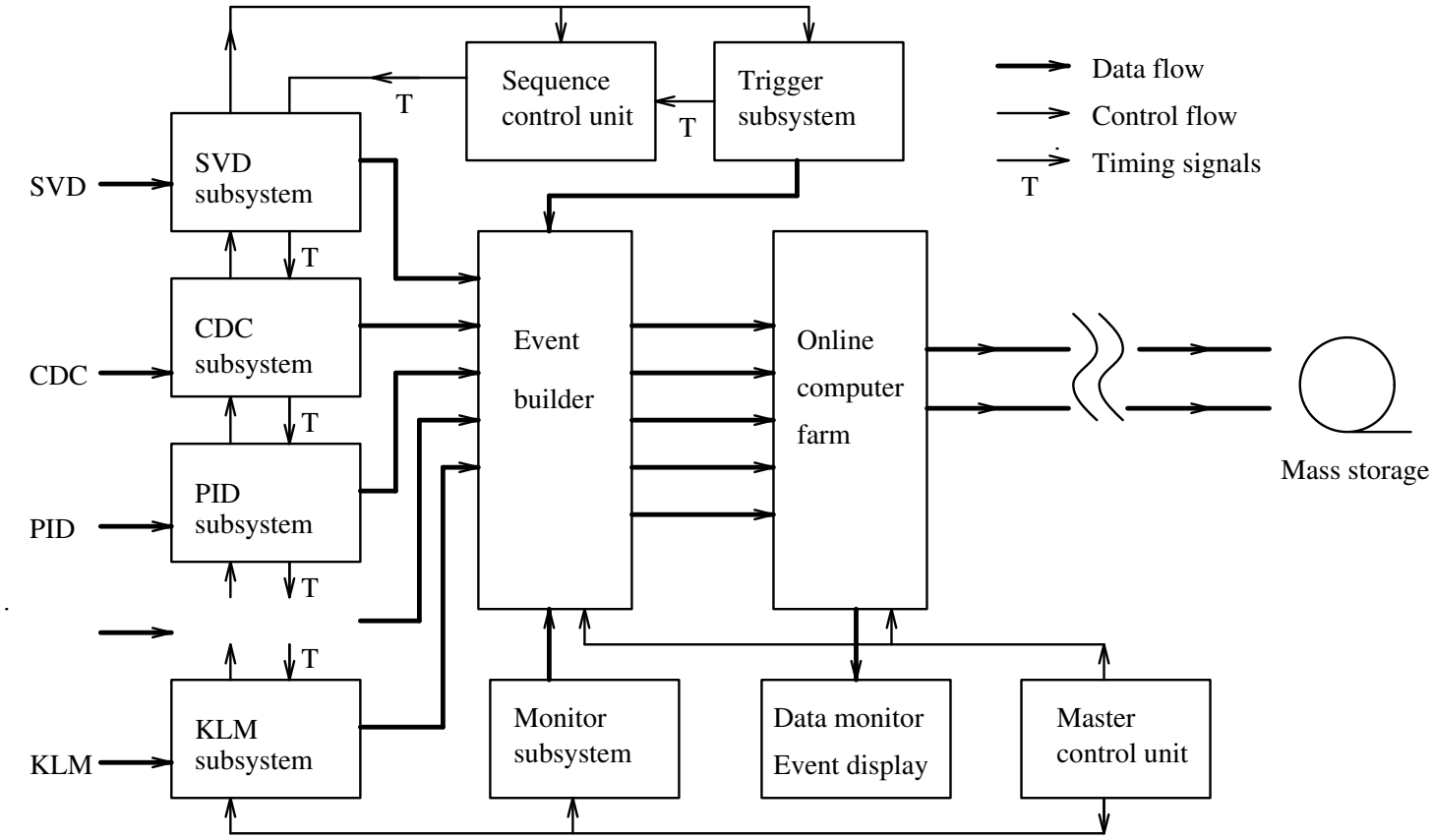


図 3.8: BELLE データ収集システム

# 第 4 章

# ECL トリガーシステム

カロリメータトリガーの主な役割は、カロリメータで測定した粒子のエネルギー情報を使って、物理事象を選別することである。本トリガーシステムでは、全エネルギー和及び、十分大きいエネルギーが観測されたカウンターの個数の情報を使って、物理事象を識別する。また、頻度の高い Bhabha 散乱を見分け、そのトリガー頻度を下げることも重要な役割である。これらの判断は、$1.8\mu sec$ 以内に下す必要があり、これがシステムを組む上での鍵となる。

この章では、まずは母体となる CsI 電磁カロリメータ (ECL) について説明する。次にカロリメータトリガーの全体構成及び各部の構成について説明し、具体的なエレクトロニクスモジュールの構成について詳しく述べる。

## 4.1 電磁カロリメータ

カロリメータとは、粒子のエネルギーを測定する装置である。シンチレーション（蛍光）物質内に飛び込んだ高エネルギーの粒子は、カスケードシャワーを起こし、その持っているエネルギーは、物質が十分厚ければ、結晶内の原子に全て吸収されてしまう。励起された原子は、吸収したエネルギーに比例した量のシンチレーション光を出す。シンチレーションカウンターはこの性質を利用して粒子を検出するようつくられたものであり、信号の読み出しは、シンチレーション光をフォトダイオード、あるいは光電子増倍管によって電気信号に変換することで行われる。このシンチレーションカウンターを大量に並べたものが、カロリメータである。電子·光子のエネルギーを失う過程は、電磁相互作用であるため、これらのエネルギーを測定するカロリメータは特に、電磁カロリメータと呼ばれる。

## 4.2 BELLE CsI 電磁カロリメータ

奈良女子大学が製作に携わっている CsI 電磁カロリメータ（ECL）では、シンチレーション物質に CsI(Tl) 結晶、光信号の検出にフォトダイオードを用いている。

### 4.2.1 構造

CsI 電磁カロリメータは、8736 本（総重量約 40t）本のシンチレーションカウンターからなる。カウンターは全て、衝突点に向けて配置される（図 4.1）。カロリメータはバレル部、前方·後方エンドキャップ部に分けられ、電子ビーム軸からの偏角 17.0° ～ 150.0° の範囲を覆う。カウンターを収める構造体は機密性を持ち、5% という低い湿度の中に結晶が保たれている。

### 4.2.2 カロリメータへの要求

CsI 電磁カロリメータの役割は、電子·光子のエネルギーと入射位置の測定である。BELLE 実験において、電子·光子のエネルギーは、約 20MeV から 8GeV とかなりの広範囲に及ぶが、B 中間子の崩壊により生じる光子のエネルギーは、その大半が 500MeV 以下という低エネルギー領域に属する。そのため CsI 電磁カロリメータは、特に低いエネルギーについての良い分解能が求められる。

### 4.2.3 CsI(Tl) 結晶

CsI(Tl) 結晶は、タリウム活性化ヨウ化セシウムの結晶である。この結晶がシンチレーション物質として選ばれた理由は、広範囲のエネルギー測定が可能であること、光量が大きいため低いエネルギー領域でも良いエネルギー分解能が得られること、潮解性が比較的少ない、などがあげられる。また、BELLE 実験は非常にルミノシティが高いので、放射線耐性の高いものが求められた。

結晶の形状は四角錐台である。9000 本の結晶は全て結晶の衝突点を向くように隙間なく配置される（図 4.3 ）ので、カロリメータ中の場所によりサイズは少しずつ異なる。代表的なものは、前面が $55 \times 55mm^2$、後面（シンチレーション光を読み出す面）が $65 \times 65mm^2$、長さが 300mm である。この長さは、$16X_0$(放射長) に相当する。

サイズは、結晶の中心に光子が飛び込んだ場合に、光子のエネルギーの約 80% がその結晶中でとらえられる、との要請より決められた。長さは長ければ長いほど良いのだが、検出器全体の大きさを考えなければならず、また長さが不十分であると、

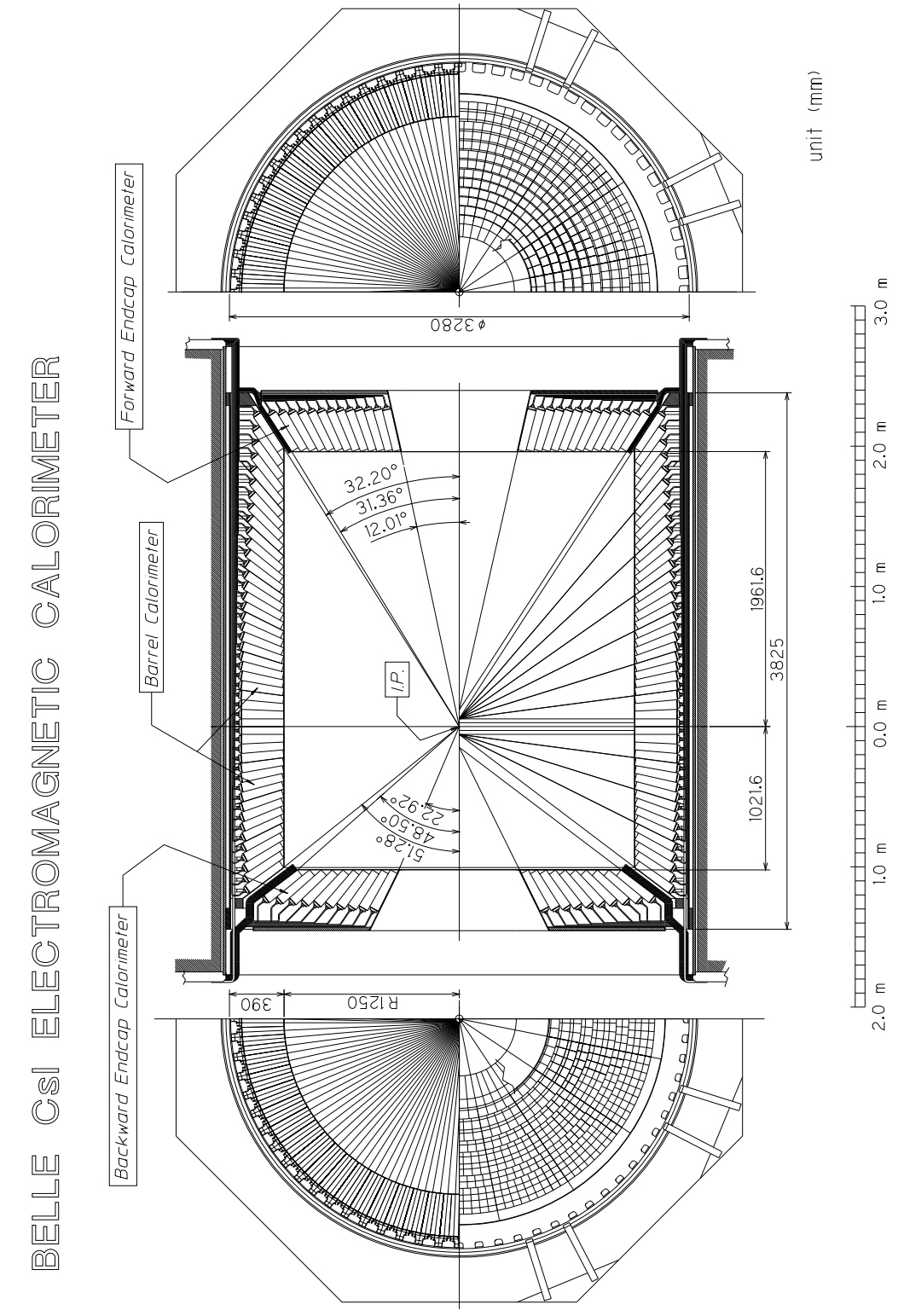


図 4.1: カロリメータの構造

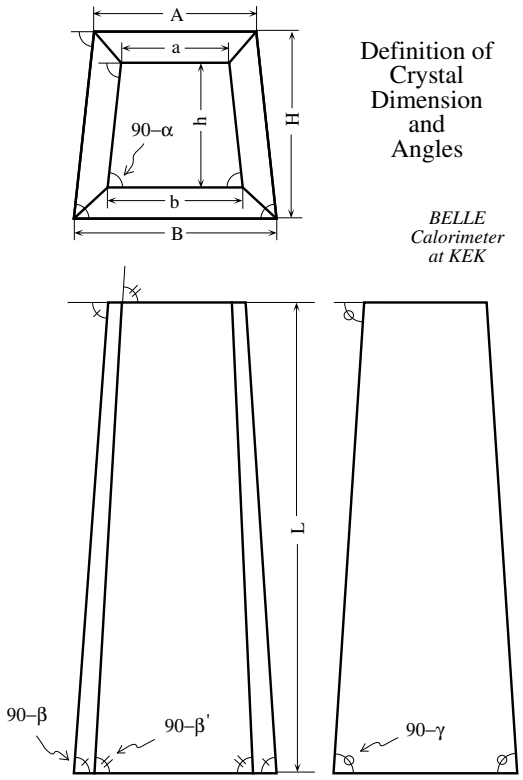


図 4.2: CsI(Tl) 結晶の形

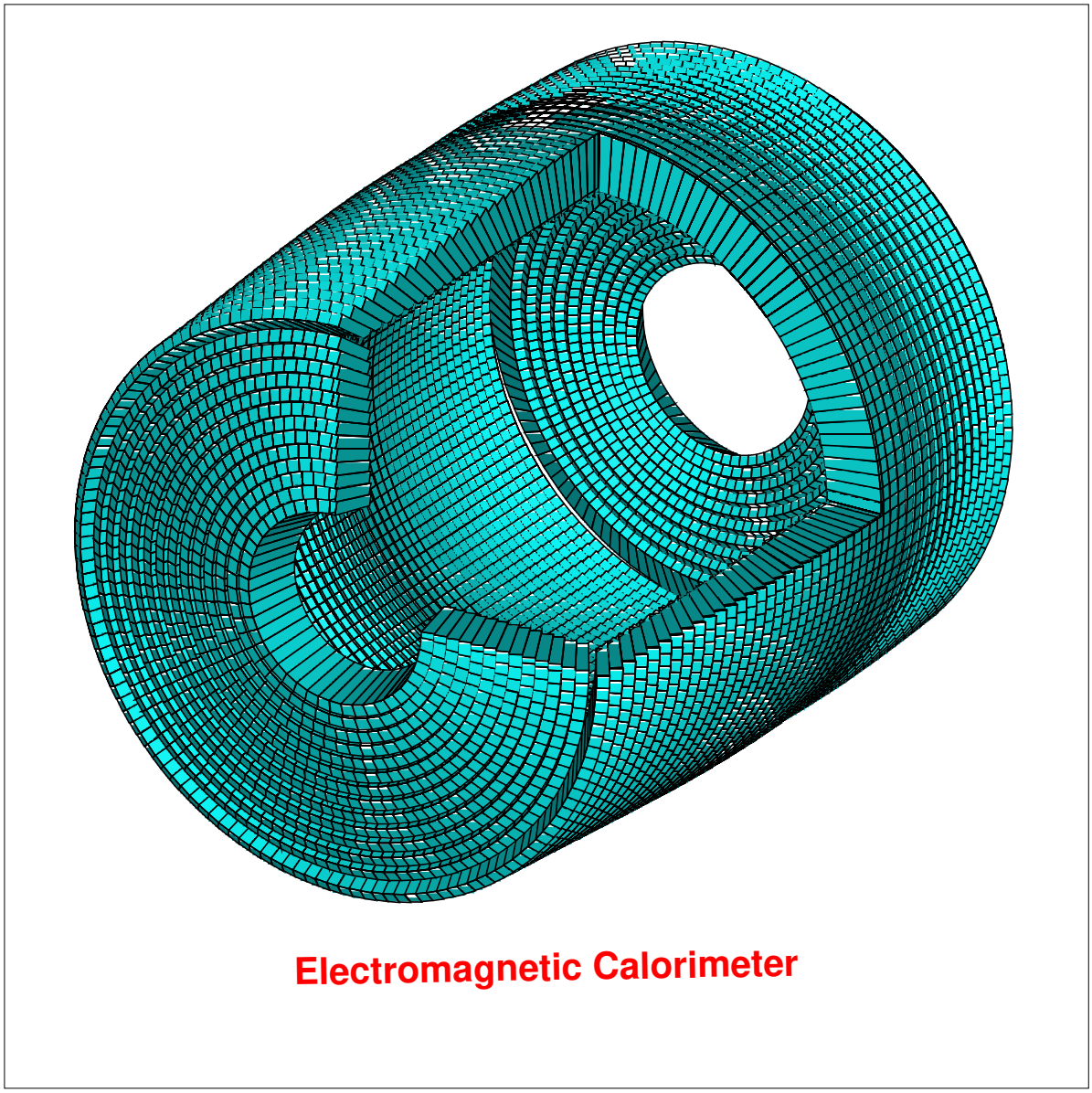


図 4.3: 結晶の配列の様子

後方にシャワーが洩れてしまいエネルギー分解能が悪化することがわかっている。よって、両方の条件を満たす最小値が選ばれた。

結晶の製造は、ロシア (Budker Institute of Nuclear Physics)、フランス (Crismatec 社)、中国 (Joint Crystal Collaboration Group) において行われた。

### 4.2.4 CsI カウンター

#### 概要

CsI(Tl) 結晶にフォトダイオード (PD) と電気信号を増幅するプレアンプ（前置増幅器）を取り付けたものを CsI カウンターと呼ぶ。CsI 電磁カロリメータは、1.5T のソレノイドより内側におかれるので、磁場に弱い光電子増倍管でなく、磁場に強いフォトダイオードを光の検出に用いている。またフォトダイオードの感度は、CsI(Tl) 結晶から出るシンチレーション光の波長に適合している。

ひとつの CsI カウンターには 2 枚の PD が取り付けられており、それぞれは 2 個のプレアンプにより別々に増幅されるので、2 つの独立な信号を得ることが出来る。この様にすれば、読み出しの面を大きくすることができ、また片方が実験中に壊れてしまった場合ももう一方によって支障なく測定を行うことが可能になる。

プレアンプは、電荷有感型ハイブリッドプレアンプで、本実験用に開発されたものである。低エネルギー領域で特に影響の大きくなる電気的ノイズを如何に少なくするか、また長期に渡る性能維持、線形性の維持、という点が重視された。

PD とプレアンプの性能について、テスト結果を表 4.1, 4.2 に示す。

#### 構造

個々の結晶は集光効率をあげるため、後面を除いて厚さ $200\mu m$ の白色ゴアテックッステフロンシートで包まれる。さらにその上から厚さ $25\mu m$ のアルミナイズドマイラーで包み、光と電気的ノイズを遮断する。

結晶と PD の剝離は光量の減少を引き起こすため、両者の接着には特に注意を払う必要がある。温度による変動が見られてはならない。

2 個の PD は厚さ 1mm のアクリル板を通して結晶の後面に接着される。接着剤は、各面とも ECOBOND24 エポキシ樹脂接着剤 (Grace Japan Co. 製) が用いられ、その温度耐性は $10°C \sim 50°C$ まで保証されている。

プレアンプはアルミニウムのシールドケースに入っていて、結晶後面にネジ止めされたアルミフレーム上にボルトで固定される。結晶を包んだアルミナイズドマイ

表 4.1: フォトダイオードの仕様

| | | |
|---|---|---|
| Sensitive Aria | 10×20 mm | |
| Thickness of Wafer | 300$\mu$m | |
| Applied Reverse Voltage | $\leq$ 70V | |
| Capacitance | avwrage $\leq$85pF max$\leq$105pF | |
| Sensitivity($\lambda = 560nm$) | average $\leq$320mA/W min$\leq$310mA/W | |
| temperature dependence | $\leq$ 0.01% | |
| Dark current | average $\leq$4nA max$\leq$15nA | |
| temperature dependence | average $\leq$ 10%/$^\circ C$ | |
| Radiation Hardness | at 6 Gy | at 68 Gy |
| change of dark current | $\leq$ 8% | $\leq$40% |
| change of capacitance | $\leq$0.4% | $\leq$ 1% |
| change of sensitivity | $\leq$0.3% | $\leq$0.3% |

表 4.2: プレアンプの性能テスト結果

| | |
|---|---|
| Feedback capacitance | $1.6pF$ |
| Decay time | $80\mu seca$ |
| Power/hybrid chip | $125mW$ |
| ENC with one photodiode ($\tau = 1\mu s$) | $670electrons$ |
| ENC with one photodiode ($\tau = 2\mu s$) | $615electrons$ |
| Gain | $39mV/10^6electrons$ |
| Max. gain deviation of over 50 pcs. | 1.5% |
| Dynamic range for input charge | $4.5 \times 10^7electrons$ |
| Dynamic range at the preamplifier output | $4.5V$ |

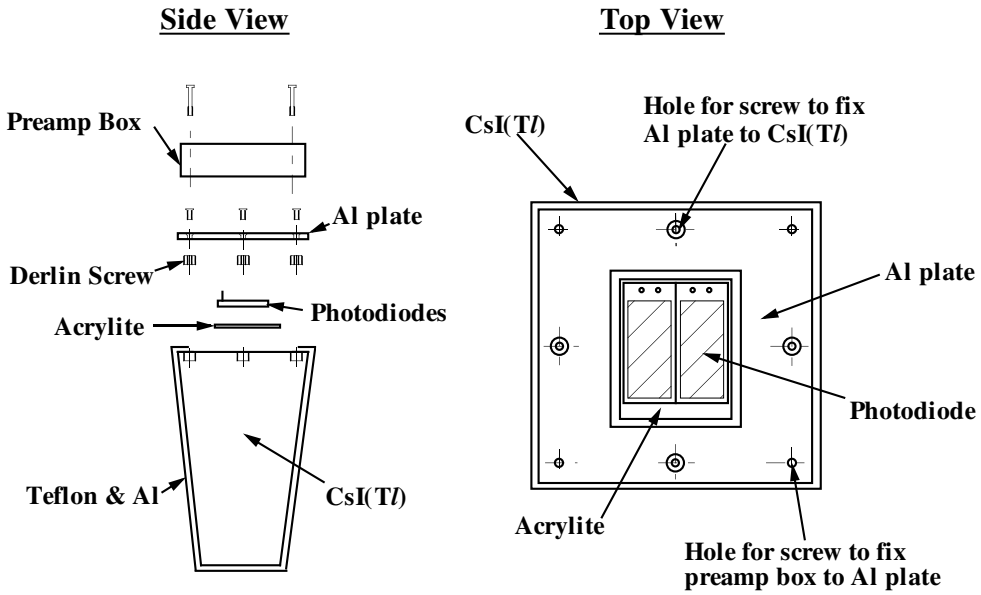


図 4.4: CsI(Tl) カウンターの構造

ラーをこのアルミ板の下に挟み込み、プレアンプのケースと電気的に接触させる（図 4.4）。

また、プレアンプには発光ダイオード (LED) が取り付けられている。LED はテフロンの反射シートに開けられた小さな穴を通して、後面から結晶を照らす。これは結晶の透明度、接着状態、PD やその後に続くエレクトロニクスのゲイン等のシンプルかつ素早いテストにテストに用いられる。

### 4.2.5 カロリメータ信号の精密測定

CsI 電磁カロリメータからの読み出しは 2 系統に大別される。

一方は個々の結晶の情報を読み出し、エネルギーを精密に測定する。もう一方はトリガー信号を出すための系統である。

電磁カロリメータでは、20MeV~8GeV という広範囲のエネルギーを良い分解能（2~3% ）で測定する必要がある。そのため、エレクトロニクスは 17~18 ビットという広いダイナミックレンジ、かつ、0.3MeV という低いノイズが要求される。

ここではこのエネルギーの精密測定回路について述べ、次のセクションでカロリメータトリガーの回路構成を説明する。

プレアンプで増幅された信号は、シェーパー QT モジュールに送られる。シェー

図 4.5: ECL 読み出しシステムの概要

パー QT モジュールは、信号の整形を行うシェイピング部と信号の電荷を、それに比例した時間に変換する Q–T 変換器から成る。

エネルギーの精密測定用信号は、シェイピングされた後、Q–T 変換器によって時間情報に変換される。これはさらにマルチヒット TDC (時間デジタル変換器) によってデジタル化され、個々のカウンターのエネルギーに比例した量が最終的には数値となって出力される。

トリガー用の信号は、シェーパー QT でシェイピングだけされて、アナログ信号のまま出力され、様々なモジュールを経てようやくトリガー用信号となる。

### シェーパー QT

シェーパー QT モジュール (SHQT) はサムアンプ、 pole-zero 回路、整形回路、電荷 - 時間変換の 4 つの部分からなる。カウンター約 9000 本全ての信号が、別々のチャンネルで受けられる。

サムアンプはプレアンプからの二つの出力を足し合わせる。 pole-zero はプレアンプからの $50\mu sec$ という非常に長い立ち下がり時間を持った信号を $1\mu sec$ まで短くする。整形回路では、信号の周波数の高い成分と低い成分をカットすることによってノイズを落とす。電荷 - 時間変換は LeCroyMQT300 チップを使って行う。

シェーパー QT は、各々のカウンターからの 1 入力に対して、 2 種類の出力を持つ。一つはトリガー信号用の高速出力、もう一つはエネルギー精密測定用の低速出力である。

プレアンプからの信号が $1/e$ の大きさまで減衰するのに要する時間は、プレアンプの時定数により決まる。本プレアンプの場合、減衰時間は $\tau = 50\mu sec$ と非常に長い。

### 整形回路

整形回路は、ノイズの周波数成分を狭くすることによって、ノイズを落とす役割を担っている。本回路では、 CR–RC 三段回路が使われており、その時定数は $1\mu sec$ である。

最適なノイズカットを施した後のピークまでの時間は、一段カットで $1\mu sec$。これより、最終的なピークまでの時間は $3\mu sec$ となる。

GDL からの最終トリガーは、シェーパー QT の QT 変換ゲートとして用いられる。整形回路からの低速出力は、 GDL からのゲート信号が入力され次第、 MQT チッ

| 計数 | 3by3matrix | 5by5matrix | 6by6matrix(Threshold) |
|---|---|---|---|
| A | 0.57 MeV | 1.79 MeV | 0.47 MeV |
| B | 1.52 % | 0.58 % | 0.87 % |
| C | 0.95 % | 1.41 % | 1.13 % |

プ（18 ビット）でその電荷が時間に変換される。これはその後、LeCroyTDC1877s に送られる。

速い立ち上がりを求められるトリガー用信号は、整形回路を一段だけ通してノイズを落とす。この場合、ピークまでの時間は $300nsec$ である。

しかしこのままでは、個々のノイズは大きく、カロリメータ中の何千本というカウンター全てについて和をとることは出来ない、

### 4.2.6 カウンターのエネルギー分解能

ロシアの BINP で行われたビームテストの解析から、CsI カウンターのエネルギー分解能が求められている [15]。

テストでは、CsI カウンターを $6 \times 6$ のマトリックスに並べた状態で光子ビームを当て、PD、Shaper、ADC での読み出しを行った。

図 4.6 が解析の結果である。それぞれ、カウンターを $3 \times 3$、$5 \times 5$、$6 \times 6$ のマトリックスに組んだ場合であり、$6 \times 6$ に関しては 50MeV の敷居値が設定されている。

フィッティングに用いた関数は、

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{A(MeV)}{E(MeV)} \times 100(\%) \oplus \frac{B(\%)}{E^{\frac{1}{4}}(GeV)} \oplus C(\%)$$

パラメータはそれぞれ、

となっている。

カウンターのエネルギー分解能は、適当なエネルギー敷居値を設定してやることで、特に低エネルギー領域において良い結果が得られることがわかっている。

## 4.3 カロリメータから出されるトリガー信号

カロリメータトリガーは、CDC の飛跡トリガーと並んで BELLE 2 大トリガーの一つである。その役割は、物理事象の同定 — 様々なバックグラウンドの中から

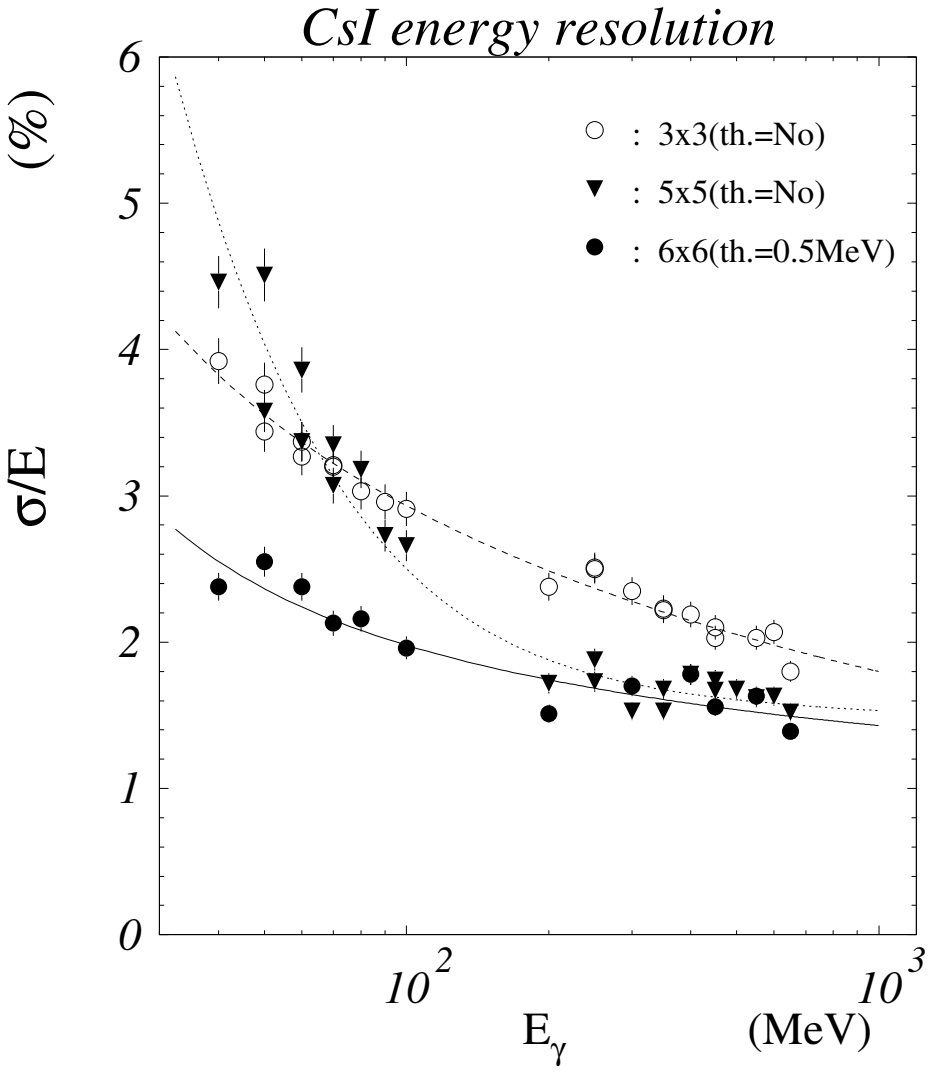


図 4.6: CsI(Tl) カウンターの分解能

$e^+ \cdot e^-$ 衝突による事象の選別を行う（物理トリガー）。さらにその中で Bhabha 散乱による事象については、他の物理事象から明確に区別し、頻度を下げて（$\sim \frac{1}{100}$）トリガーを出す（Bhabha ビトー（禁止）トリガー）。

これらを実行するために ECL トリガーシステムで行うことは、全エネルギー和による判定、クラスターの計数による判定、そして Bhabha 散乱を識別するための特別な結晶の組合せによるエネルギー値の判定である。ここでクラスターとは、連続した結晶群で、一つの塊の様に信号が観測される状態を指す。粒子が結晶中でシャワーを起こすと、このような状態で観測される。

これらのトリガー信号の、具体的な形成の方法を以下に説明する。

カロリメータは全体で 8736 本もの結晶を使用するため、個々の信号を一度に加えることは出来ない。そこでまず、$4 \times 4 = 16$ 個程度の結晶について信号の和をとり、トリガーの基本単位としている。以下、これをトリガーセル (TC) と呼ぶ。

トリガーセル内の結晶本数は、カロリメータの幾何学的構造上、各部によって微妙に異なるが、バレル部は後方側の端を除いて $4 \times 4 = 16$ 本（後方の端は $2 \times 4$）、前方エンドキャップ部は各セルが 11 $\sim$ 13 本、後方エンドキャップ部は 14、16 本になるよう配分が工夫される。

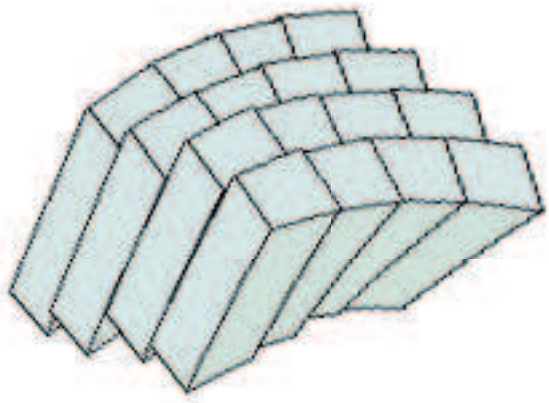

図 4.7: トリガーセル

ECL では、このトリガーセルの信号を二つに分けて、大きく二種類のトリガー信号を作る。

ひとつは、トリガーセルからのアナログ信号をさらに多くの結晶についてたし合わせていくことによって形成されるトリガーで、この方法によって全エネルギートリガー、Bhabha トリガーを作る。

もうひとつは、トリガーセル単位で敷居値 (50MeV) を設け、それを超えたエネルギーを持つトリガーセルを数える方法によるものである。これをクラスタートリガーと呼ぶ。

### 4.3.1 全エネルギー和トリガー

ビームバックグラウンドのシミュレーション研究により、全エネルギー和は後方エンドキャップ部を除いて行うことが決められている [17]。これによって、ビームのバックグラウンドを 10Hz まで下げることができるからである。

バレル部·前方エンドキャップ部に落とされた粒子のエネルギーについてアナログ和をとるため、クラスターからの信号だけを数段階に分けて足し上げていく。

また、このシミュレーションによって決められた $E_{TOT}$ の条件は、

$$E_{TOT} > 1GeV$$

である。

### 4.3.2 クラスター計数トリガー

クラスターを数えて、その数 (ICN) を条件とする。これも、全エネルギー和トリガーと同様、後方エンドキャップは除く。

シミュレーションにより決定された ICN によるトリガー条件は、

$$ICN > 3$$

である。

### 4.3.3 物理事象のトリガー条件

上記二つのトリガー条件の内、どちらか一方でも満たせば物理事象であると判断される。

$$(E_{TOT} > 1GeV) \oplus (ICN > 3)$$

### 4.3.4 Bhabha トリガー

Bhabha 散乱による事象は、積分ルミノシティの精密な測定とカロリメータの較正に用いられる。しかし、Bhabha 散乱は、他の物理イベントよりもはるかに頻度が高いため、起こった事象全てについてデータをとることは、メモリの無駄になるばかりか他のイベントの偶発的ロスを引き起こしかねない。そこで、Bhabha 事象に関しては、100 回の事象発生に対して 1 回だけトリガーを出して、データ収集の頻度を下げる。そのためには、他の物理事象から Bhabha 散乱事象を明確に区別しなければならない。Bhabha 事象は、物理トリガーの条件を満足するので、これとは別に特別な Bhabha 用トリガー条件が必要となってくる。

#### Bhabha 事象の選別

Bhabha 事象は、重心系で Back to Back に出る（反応後の粒子が、ちょうど対称な方向に出ること）という性質を利用して識別することができる。KEKB は非対称エネルギーのコライダーであるため、実際（実験室系）の $e^+ \cdot e^-$ 検出位置は Back to Back ではないが、ある特定された位置にほとんどのエネルギーを落とすのでその組合せを考えれば良い。後方エンドキャップは、この Bhabha トリガーでのみ使用される。

Bhabha トリガーのために、カロリメータは図 4.8 の様に分けられる。

Bhabha トリガーの具体的な条件を表 4.3 にまとめる。

この 11 通りの条件のどれか一つにでも当てはまること、かつ、$ICN < 4$ であることが、Bhabha の条件である。また、11 の組合わせは、$\theta$ に依存しているので、各 $\theta$ 毎でトリガー頻度を調整し、どの $\theta$ についても同程度の量でデータをとるということが可能である。

また、物理事象がこの Bhabha ビトートリガーによって、落とされる割合は、0.3% 程度にすぎない。

### 4.3.5 宇宙線バックグラウンドの除去

宇宙線のシミュレーションによる研究で、物理トリガーにかかる宇宙線の頻度は 42.7Hz となることがわかった [18]。CDC の飛跡トリガーを用いずにこの頻度を減ずるためには、新たにトリガー条件を付加する必要がある。

衝突点から来る粒子は、z 方向から $r\phi$ 平面を見た時、Back to Back に出る数が大体釣り合っている。そこで、カロリメータ全体を図 4.9 (a) の様に 4 分割し、それ

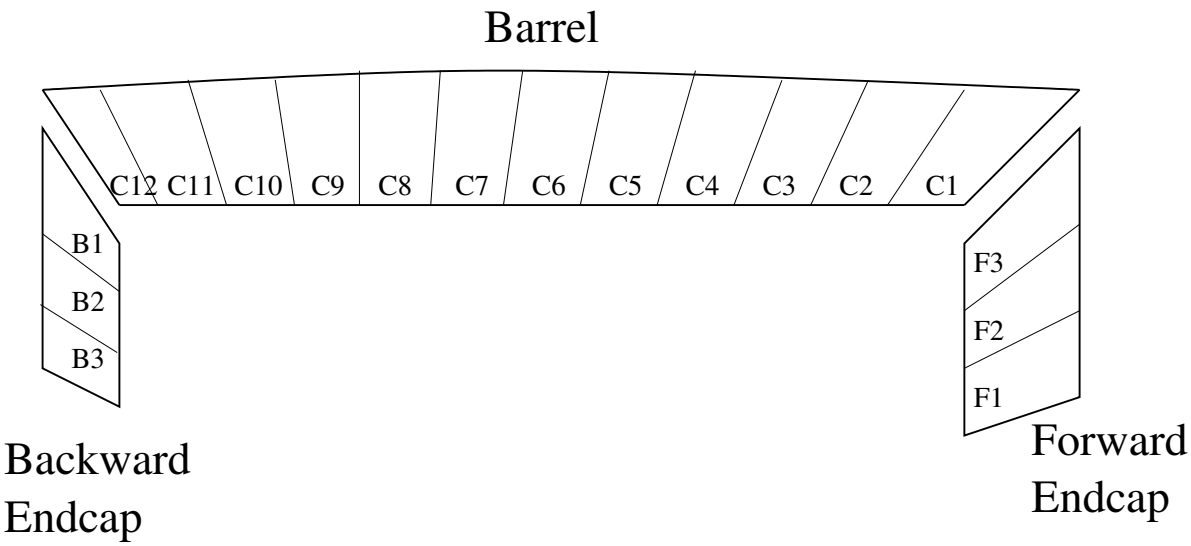


図 4.8: Bhabha トリガーのためのカロリーメータの区分

表 4.3: Bhabha トリガーの条件

| cut number | CUTS | | |
|---|---|---|---|
| cut1 | $(\Sigma F1 + \Sigma F2 + \Sigma B1 + \Sigma B2 + \Sigma B3)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut2 | $(\Sigma F2 + \Sigma F3 + \Sigma B1 + \Sigma B2 + \Sigma B3 + \Sigma C11 + \Sigma C12)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut3 | $(\Sigma F2)$ | $> 6.5GeV$ | backward gap |
| cut4 | $(\Sigma F3 + \Sigma C10 + \Sigma C11 + \Sigma C12)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut5 | $(\Sigma C1 + \Sigma C9 + \Sigma C10)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut6 | $(\Sigma C1 + \Sigma C2 + \Sigma C9)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut7 | $(\Sigma C2 + \Sigma C8 + \Sigma C9)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut8 | $(\Sigma C3 + \Sigma C7 + \Sigma C8)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut9 | $(\Sigma C4 + \Sigma C6 + \Sigma C7)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut10 | $(\Sigma C5 + \Sigma C6)$ | $> 9.0GeV$ | |
| cut11 | $(\Sigma C10)$ | $> 3.5GeV$ | forward gap |

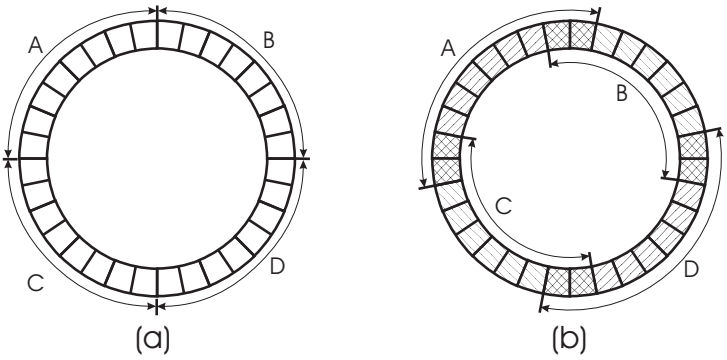


図 4.9: 宇宙線除去のための区分

ぞれの部分の孤立クラスターの数をもって、トリガー条件を定義する。

$$(ICN_A > 0 \otimes ICN_D > 0) \oplus (ICN_B > 0 \otimes ICN_C > 0)$$

これを物理トリガーに加えると、宇宙線のトリガー頻度は 5.1Hz まで減少する。

宇宙線除去の条件は、物理事象に対するトリガー効率の減少を引き起こすことが予測されている。表 4.4に物理事象のカロリメータトリガーによる最終的なトリガー効率をまとめる。

## 4.4 ECL トリガーエレクトロニクス

カロリメータトリガーに要求されることは、(1)1.85$\mu sec$ 内にトリガー信号を出すこと (2) ノイズを小さくすること、つまり、敷居値はトリガーセル単位で 50MeV に設定されるので、それ以下に抑えること (3)CsI 結晶からのシグナルそのものが遅いので、信号を速くするよう工夫をしなければならないこと、である。

### 4.4.1 トリガーの概要

セクション 4.3 で述べられたそれぞれのトリガー信号を出す手順を簡単に説明する。モジュールの詳しい説明は次に述べる。

シェーパー QT(SHQT) からのトリガー用高速信号は、サム／トリガーモジュール (STM) でトリガーセル分足し合わされ、トリガーセル信号が作られる。トリガーセル信号がある敷居値を超えた時、STM からはアナログ和とロジック信号が出力される。アナログ和はさらにアナログアッダーモジュール (AAA,AAB) で、カロリ

表 4.4: 物理事象のトリガー効率

| Physics Mode | Trigger Efficiency | |
|---|---|---|
| | Physics Trigger | Additional cosmic ray cut |
| $B \to J/\psi K_S \to l^+l^-\pi^0\pi^0$ | 99.75 % | 99.60 % |
| $B \to J/\psi K_S \to l^+l^-\pi^+\pi^-$ | 100.0 % | 99.85 % |
| $B \to \pi^+\pi^0$ | 99.50 % | 99.10 % |
| $B \to \pi^0\pi^0$ | 99.40 % | 98.80 % |
| $B \to \rho^\pm\pi^\mp$ | 99.70 % | 98.95 % |
| $B \to \pi^+\pi^-$ | 99.65 % | 99.05 % |
| $B \to K^*\gamma$ | 99.60 % | 98.95 % |
| $B \to \tau^+\tau^-$ | 69.40 % | 54.20 % |
| Cosmic ray rate | 32.5 Hz | 9.3 Hz |
| Bhabha event rate | 9.8 Hz | |

メータ $\phi$ 方向一周分のトリガーセル和（もちろん" クラスター" だけの和である。）となる。これは $\phi$ リング和と呼ばれ、Bhabha トリガーと全エネルギー和トリガーに使用される。

図 4.10 内に示されたモジュールは、そのほとんどが CsI 電磁カロリメータ用に開発されたものである。

## 4.5 サム / トリガーモジュール

サム / トリガーモジュール (STM) の役割は、トリガーセルの情報を、後に続くモジュールにもたらすことである。ブロックダイアグラムを図 4.11 に示す。ここではシェーパー高速出力、トリガーセル分のアナログ和が形成され、それがある一定の敷居値を超えたならば、アナログ和とロジック信号を出力する。アナログ信号は全エネルギートリガーに、ロジック信号はクラスター計数トリガーとタイミングトリガーに用いられる。ロジック信号を出すタイミングは、タイムジッターを出来る限り少なくするよう工夫が凝らされている。ダイナミックレンジは $0 \sim 4V(= 8GeV)$ で入出力の線形性を保つ。

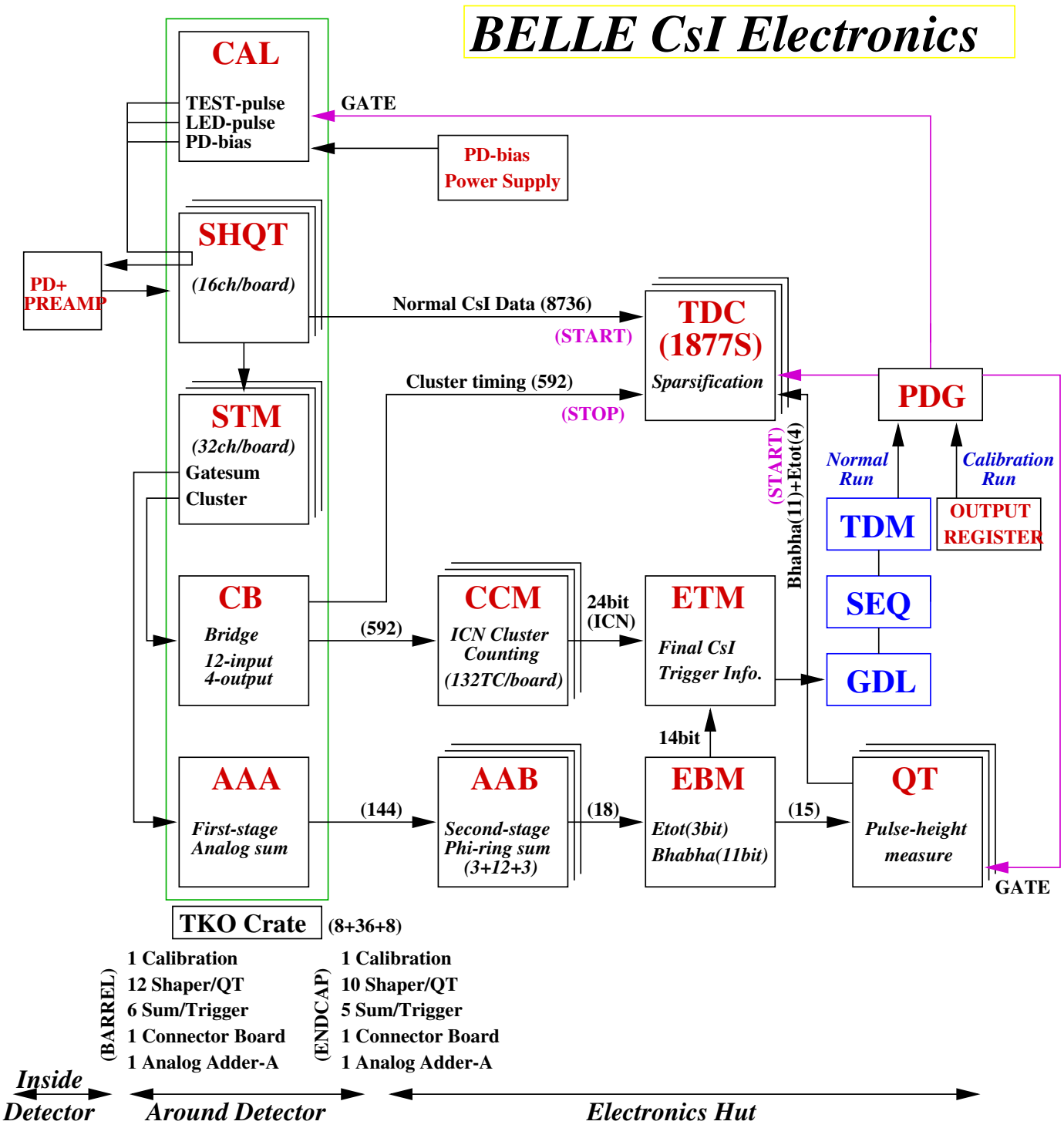


図 4.10: ECL エレクトロニクス

図 4.11: Sum/Trigger Module

### 4.5.1 入力

個々の結晶によって光量のばらつきがあるため、シェーパーからの信号はチャンネル毎に大きさが異なる。STM の入力段は、オンラインコンピュータで制御されるゲイン調整アンプを用いて、入力のばらつきを 10% 以内に押さえ、その後、各入力 4 チャンネル毎に和をとる。

### 4.5.2 ゲート出力

トリガーセルからの信号は、それがクラスターであると判断された時にのみ次のステップに進むよう設計されている。

4 チャンネル毎の和は、全て足し合わされさらに 4 つに分けられる。

一つは 16 チャンネルアナログ和のチェックに用いられる。

二つは、それぞれ全エネルギートリガー用とクラスター判定用になる。前者はバッファに保持され、ゲートが開かれるのを待つ。後者はディスクリミネータにおいて、シミュレーションで決められた敷居値 ($50 \sim 100MeV$、オンラインで制御) と比較され、それを超えたときにそこでロジック信号が起こされる。ロジック信号はクラスターの合図なので、ゲートは開かれ、アナログ信号は次のモジュール、アナログアッダーに送られる。

### 4.5.3 タイミング信号

クラスター計数用信号のタイミングは、各 4 チャンネル和信号の中でもっとも早いもののタイミングが、論理 OR 回路で選ばれる。

シェーパーからの信号は、高速信号でも立ち上がりがあまり速くないため、普通のディスクリミネータを用いていては、タイムジッターが非常に大きくなる。そこで考え出されたのが、信号のピークのタイミングに合わせてロジック信号を出力する、コンスタントフラクションディスクリミネータ (CFD) である。なお、ピークのタイミングは信号のパルス波高によらない。

#### CFD の原理

ShaperQT からの信号は、常に一定の減衰時間を持つ。つまり、波形は粒子の落としたエネルギーによってその波高が違うだけで、縦方向に相似である。

そこで、信号を二つにわけて、一方をある一定の割合で小さくし、もう一方を遅らせ、さらにこれら二つを合成する。遅らせる時間は、反転させた方のピーク時の

電圧と、そのピークが来る場所の、遅らせる方の信号の電圧が、ちょうど等しくなるような時間である（図 4.12 ）。

図 4.12: コンスタントフラクションディスクリミネータの原理

これによりピーク位置の電圧は、合成後ちょうどキャンセルされる。つまり、合成波形の波高 0 の点が、元の信号のピーク位置ということになる。よって、0 にあわせてロジック信号を出せば、常にピークのタイミングで出せることになる。敷居値は 0 ぎりぎりに設定してやれば良い。

信号を小さくする割合 (fraction) や遅らせる時間は、信号の波高によらず一定である。

この方法を用いることにより、タイムジッターの非常に小さいトリガーを出すことが可能になるのである。

## 4.6 クラスター計数モジュール (CCM)

クラスター計数モジュールの役割は、STM のクラスター信号から孤立クラスターを見つけカウントすることである。

孤立クラスターの判定ロジックは、Xilinx FPGA チップを用いて実行される。

## 4.7 コネクターボード

非常に数多くの信号をいくつかのケーブルにまとめて送電するためのモジュール。信号の加工は特にしない。

## 4.8 アナログアッダーモジュール ( タイプ A、B )

アナログアッダーモジュール (AAA,AAB) は、STM からのクラスター信号について $\phi$ 方向にカロリメーター周分のトリガーセル和をとる。これらのモジュールについては、次章で詳しく報告する。

## 4.9 全エネルギー / バーバーモジュール

全エネルギー / バーバーモジュール (EBM) は、AAB から送られてきた $\phi$ リング和を、全エネルギー和と Bhabha トリガー用 11 組のエネルギー和に仕立て上げる (図 4.13)。

前方エンドキャップ 3、バレル 12、後方エンドキャップ 3 の合計 18 の $\phi$ リング信号は全て、Bhabha 用と全エネルギー用に二つずつに分けられる。

Bhabha トリガーに用いられる信号は、予め決められた組合せ（表 4.3 ）でアナログ和がとられた後、さらに各々が二つに分けられる。一方はそのままアナログ出力 (11 アナログ）になり、もう一方はディスクリミネータで Bhabha 条件の判定がなされ、ロジック信号が出力 (11ECL) される。ロジック信号については論理 OR 回路による、Bhabha 事象の有無の判定 (1ECL) もある。

全エネルギートリガー用は、前方、後方各エンドキャップ、バレルの三領域に分けたアナログ出力 (3 アナログ) になる。

さらにこの三つの領域について和をとった上で信号を四つにわけ、一つはアナログ信号として出力、残り三つは各々ディスクリミネータを通り、三つのロジック信号 (3ECL) となる。

まとめると、

$ECL$信号 : $(11+1)_{Bhabha} + 3_{E_{TOT}} = 15ECL$

アナログ信号 : $11_{Bhabha} + 4_{E_{TOT}/E(\text{前方})/E(\text{後方})/E(\text{バレル})} = 15$アナログ

以上 15ECL 信号と 15 アナログ信号は、ECL におけるトリガーの最終判定をおこなう、ECL トリガーマスター (ETM) に送られる。

## 4.10 ECL トリガーマスター

ECL トリガーシステムで起こされる全てのトリガー信号が、ECL トリガーマスター (ETM) に集まる。図 4.14 に示す。

ETM は CCM と同様、Xilinx の FPGA チップを装備した、プログラムによってコントロールされるモジュールである。

図 4.13: $E_{TOT}$/Bhabha Module

図 4.14: ECL Trigger Master

ETM はどの種類のトリガー条件を満たしているのかを判定し、タイミングを調節した後、ECL 最終トリガー信号を GDL に送る。また、Bhabha トリガーの頻度減数はここで行われる。

## 4.11 モジュールの配置

ECL 用のモジュール群は、八角形である BELLE 検出器の各辺に据え付けられる TKO ステーションと、BELLE の隣に建てられるエレクトロニクス室（エレキハット）に分けて設置される。シェーパー QT からアナログアッダータイプ A までは TKO 規格のモジュールであり、TKO ステーション内に入る。アッダータイプ B 以降はエレキハットの中である。TKO ステーションとエレキハットの間は 30m 程の隔たりがある。

### 4.11.1 TKO ステーション

TKO ステーションは前方、後方にそれぞれ 8 つずつ配備され、各ステーションには前方で 5 〜 6 、後方で 1 の TKO ボックスが置かれる。

それぞれ (前方エンドキャップ + バレル) 部、後方エンドキャップ部をカバーする。

前方の TKO ステーションでは、一つのボックスが前方エンドキャップ用となり、残りがバレル用となる。ボックス一つには 12 台のシェーパー QT、6 台のサム / トリガーモジュールが入るようになっている。バレル部ではこれがトリガーセル $\theta$ 方向に 1 2 個に対応し、ボックスの数がトリガーセル $\phi$ 方向 4 ないし 5 個に対応する。

# 第 5 章

# アナログアッダーモジュールの開発

全エネルギー和トリガーや Bhabha トリガーは、パラメータがエネルギー値だけという非常に単純な構成のトリガーである。

そして単純であるからこそ素早いトリガーを出すことが可能であり、またその単純さにも関わらず、非常に確実な判定を出すことの出来るトリガーである。

本トリガー信号を作るエレクトロニクスに要求される課題は以下の四つである。

(1)9000 本近いカウンターのエネルギー和をとる必要がある。

(2) トリガー信号は $1.85\mu sec$ 以内に出さなければならない。

(3) これらのトリガーはアナログ信号によって行われるため、アナログのままで TKO ステーションからエレキハットまでという長距離の伝送を行わなければならない。

(4) アナログ信号は 10KHz のオーダーでやってくるので、もちろんその頻度に耐え得るものでなければならない。

(2) の要求から、ノイズを最少にすることはできない。全エネルギー和トリガーにおいてはそれらのノイズがほとんど全て足し合わされるため、個々のノイズは非常に大きな問題となる。また (3) では、如何に電気ノイズをのせてしまうことなく伝送するかが課題となってくる。

アナログアッダーモジュールは、この要求を満たしつつ、カロリメータのアナログ和を構成していくモジュールである。この章では、アナログアッダーモジュールの設計、開発からテスト結果までを報告する。

## 5.1 モジュールの機能と設置場所

## 5.2 モジュールの機能

アナログアッダーモジュールの役割は、サム / トリガーモジュールが出す $4\times4(=16)$結晶(トリガーセル) の信号和をさらに足し合わせて、最終的には全結晶の信号の和及び Bhabha 事象の識別に必要な部分和を形成することである。トリガーセルの信号が約 600 個ほどあるので、二種類のモジュールを使って足し合わせるという構成になっている。

この様子を簡単に説明する。TKO ボックス内に置かれたタイプ A で一段階目のアナログ和をとる。$\phi$ 方向に 4 つないし 5 つのトリガーセル信号を足し合わせ、$\frac{1}{8}\phi$ リング信号を作る。$\frac{1}{8}\phi$ リング信号はツイストペアケーブルを経由してエレキハット内のタイプ B に送られ、そこで 8 つ、つまり $\phi$ リング一周分が足し合わされて一つの $\phi$ リング信号を形成する。図 5.1 にそれぞれのモジュールで足し合わされる領域を示す。

TKO ステーションからエレキハットまでの距離は約 30m である。アナログ信号の伝送においては、これら二つの場所の接地電位差、つまりコモン・モード・ノイズが大きな問題となってくる。

次のセクションでは、この問題を解決するための信号の伝送について話をする。

## 5.3 信号の伝送

通常用いられる信号の伝送方法には、電圧信号として送る方法と、電流信号として送る方法がある。電圧信号方式では、出力インピーダンスが非常に小さいので、受け側の抵抗値によらない送電側の電圧だけに依存した電圧出力が得られる。

これに対して、電流駆動方式では出力側の出力インピーダンスが非常に大きい。これは、アナログ信号の長距離伝送によく持ちいられる手段である。この方法では受け側で電流に比例した電圧出力が得られる。

以下、信号の伝送が行われる二点間の接地に接地電位差が生じている時（外来ノイズがある時）出力信号にどのような影響が出るかを見る。

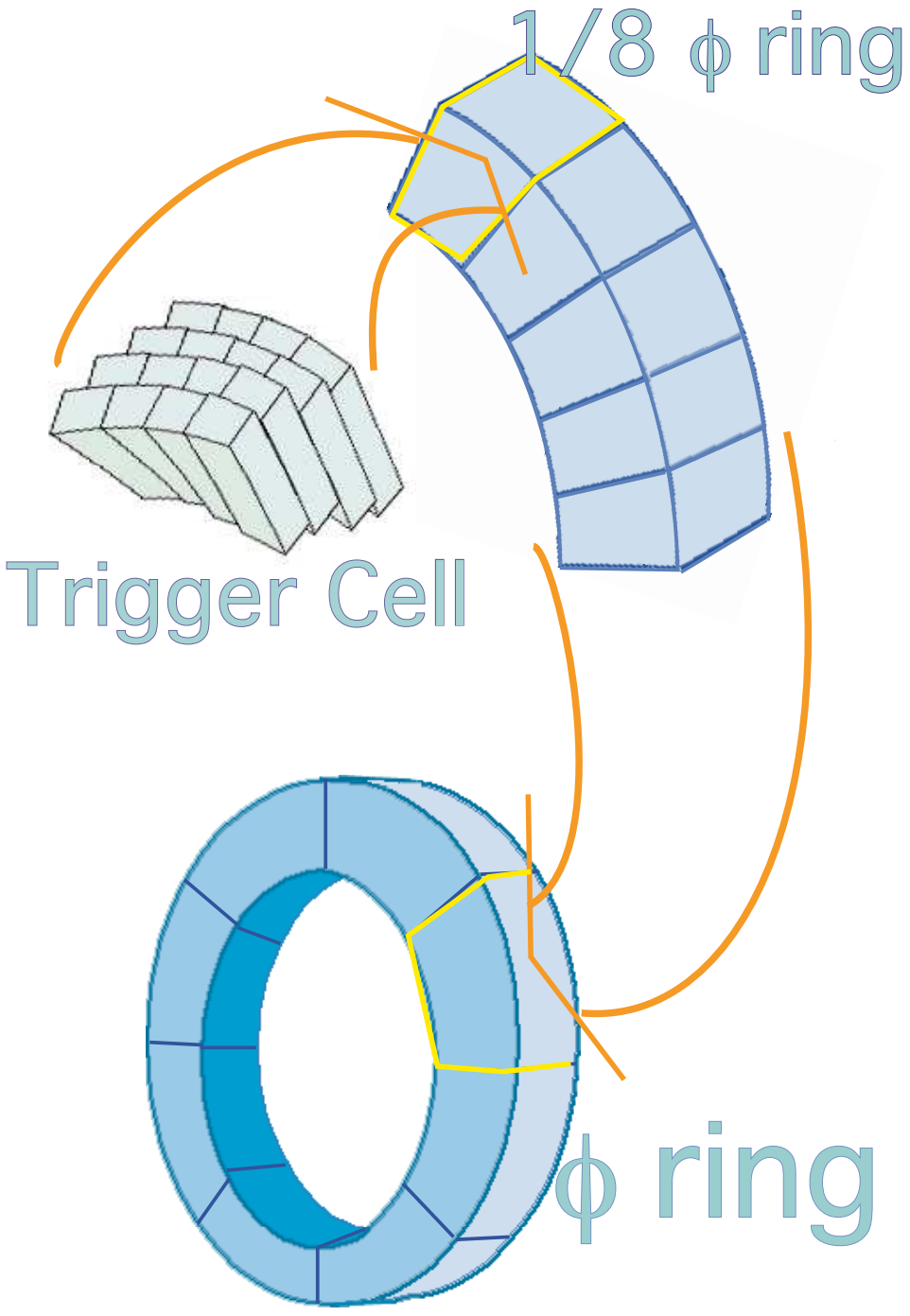


図 5.1: トリガーセル ∼ $\phi$ リング和

### 電圧駆動方式

電圧駆動方式の場合の等価回路を図 5.2 に示す。ここで $V_S$ は信号電圧、$R_S$ は信号源インピーダンス、$R_{C1}, R_{C2}$ はケーブルのインピーダンス、$R_G$ は GND のインピーダンス、$R_L$ は受け側の入力インピーダンスである。

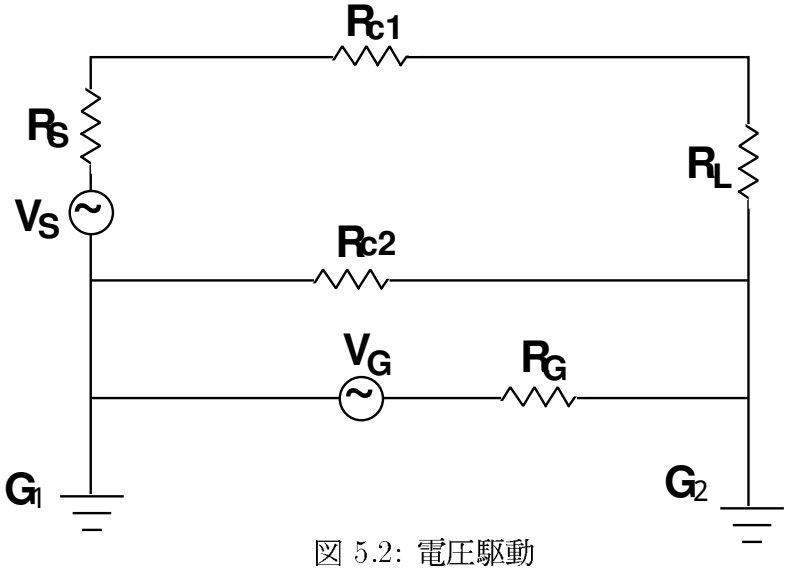


図 5.2: 電圧駆動

今 GND 電位 $G_1$ と $G_2$ で接地電位差 $V_G$ が生じているとする。このとき $R_{C1}, R_{C2}, R_G << R_L$ であれば、出力は

$$V_{out} \sim \frac{R_L}{R_L + R_S}(V_S + V_G)$$

となる。つまり接地電位差がコモン・モード・ノイズとしてそのまま出力に現れてしまうことがわかる。

### 電流駆動方式

電流駆動方式の等価回路を図 5.3 に示す。ここで出力側の出力インピーダンス $R_S$ は $1M\Omega$ のオーダーである。

同じく、GND 電位 $G_1$ と $G_2$ で接地電位差 $V_G$ が生じているとする。ケーブルの抵抗が小さいとすると $(R_{C2} >> R_L)$、この時の出力電圧は

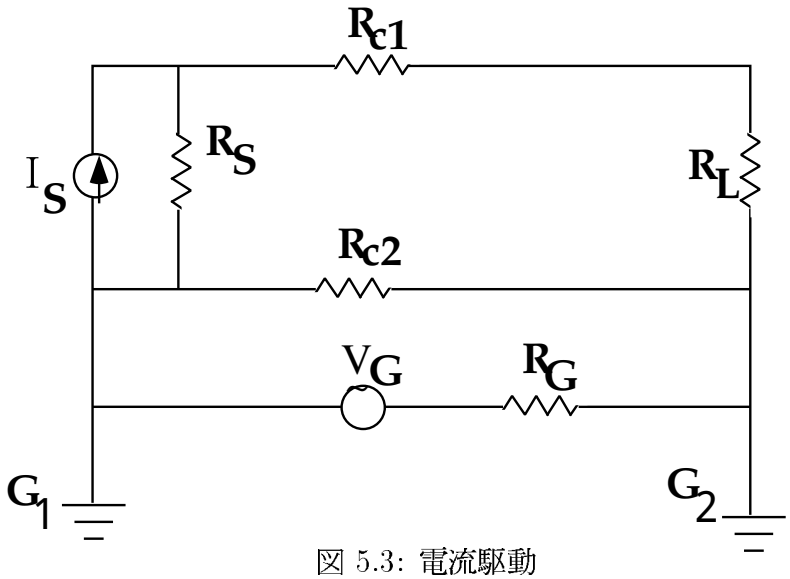


図 5.3: 電流駆動

$$V_{out} \sim R_L I_S + \frac{R_L}{R_S} V_G$$

で与えられる。つまり、電流駆動方式では接地電位差によるノイズを $\frac{R_L}{R_S}$ の割合だけ抑えられることがわかる。$R_L \sim 100\Omega$、$R_S \sim 1M\Omega$ なので、$R_L/R_S$ は非常に小さな値になる。

これらの考察からモジュールの伝送部分については電流駆動方式を用いて設計することとした。次のセクションで電流駆動方式について我々がテストした結果、セクション 5.5 以降では、このテスト結果を元に製作した実機用のモジュールの性能検査の結果を報告する。

## 5.4 電流駆動方式に関するテスト

前セクションで述べた電流駆動方式による信号伝送回路を実際に製作し、性能テストを行った。

### 5.4.1 トランスコンダクタンスアンプ

トランスコンダクタンスアンプは電圧信号を電流信号に変換する増幅器である。我々はまず、トランスコンダクタンスアンプ CA3280 用いた回路を設計し線形性の測定を行った。回路図を図 5.4 測定結果を 5.5 に示す。

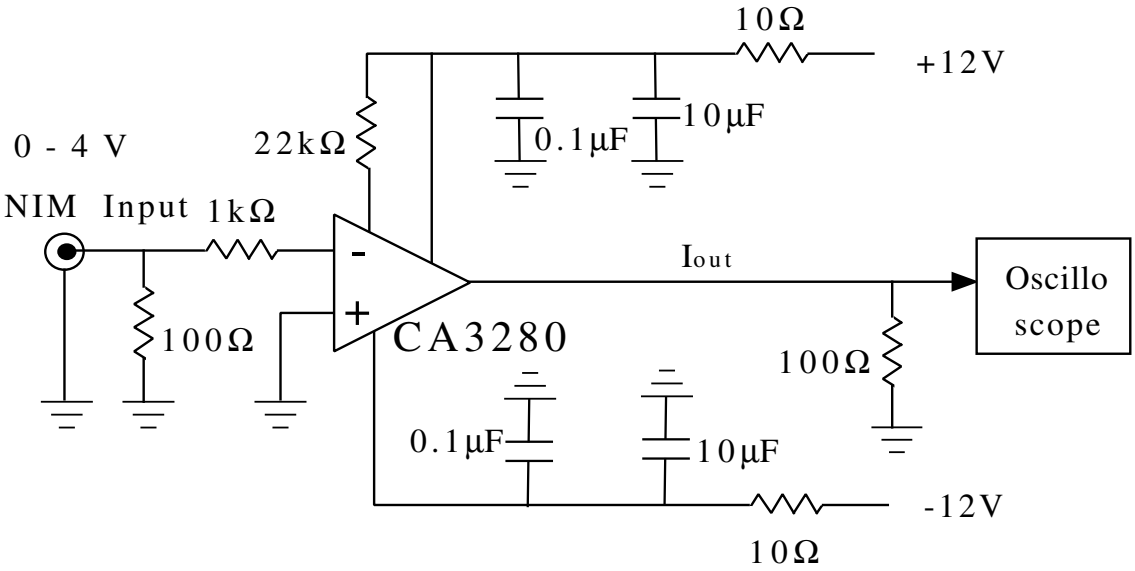


図 5.4: トランスコンダクタンスアンプによる回路

結果、得られた線形性は約 80mV までであった（図 5.5 ）。アナログアッダーモジュールに要求される線形性は $0V$ ～ $-4V$ であるので、このアンプでは我々の使用に耐えないことがわかった。

### 5.4.2 トランジスタによる電流駆動回路

次に我々は、オペレーショナルアンプ及びトランジスタを用いた回路の設計を試みた。回路図を図 5.6 に示す。ここで出力信号ははトランジスタのコレクタ側から得ている。コレクタは非常に大きな出力インピーダンスを持つ。図の左側半分が電流駆動回路であり、右半分は、それを受けるためのレシーバー回路になっている。また、　の部分はトランジスタのエミッタに定常電流を流すための定常回路となっている。

線形性の測定結果を図 5.7 に示す。この結果より、線形性は $-4.5V$ あたりまで確認された。また、回路のゲインはフィッティング線の傾きより約 0.9 である。 1.5V

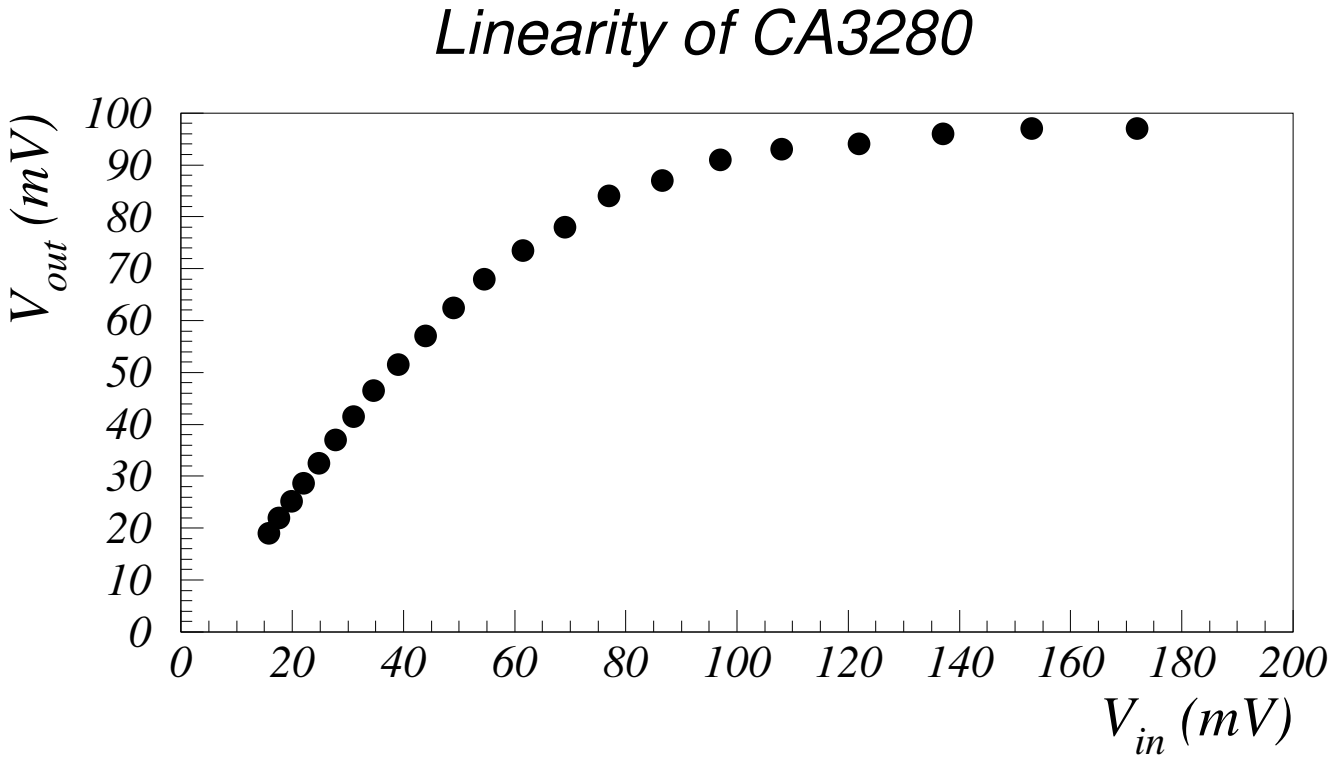


図 5.5: トランスコンダクタンスアンプの線形性

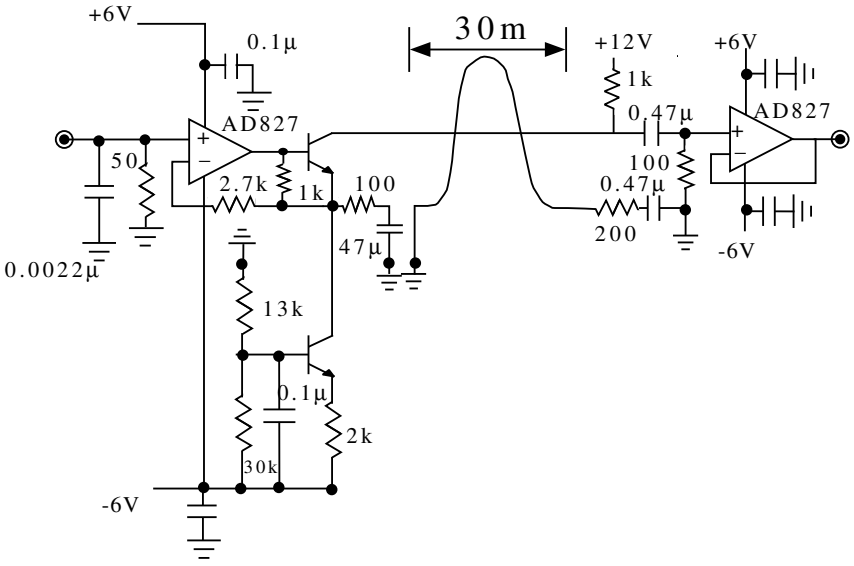


図 5.6: トランジスタを用いた電流駆動回路

以下に見られる線形性よりのずれはオシロスコープの読みとり誤差と思われる。

次にこれを実際に 30$m$ のツイストペアケーブルによって伝送し、その線形性と減衰率を調べてみた。ツイストペアケーブルを使うことによって、まわりの電磁波の影響や、自身の発する電磁波の影響をキャンセルすることができる。

線形性の測定結果を図 5.8 に示す。

30m のケーブルで接続しても、変わらず $\pm$ 1.5% 以内で良い線形性を保っていることがわかる。

ケーブルによる信号の減衰率はゲインを先の結果と比較することによって得られる。$0.8907 \div 0.8950 = 0.995$ より、30m のケーブルで 0.5% 程度であった。

上の線形性テストの結果この方式は電流駆動のアンプとして使えそうであることがわかったので、以下より詳しいテストを行った。テスト項目は、(1) 二つの連続する信号の間隔がどの程度の時まで正しく動作するか。
(2) 接地側にノイズが混入した時、それの影響をどこまで小さくできるか。
以上二点である。それぞれ 5.4.3、 5.4.4 で報告を行う。

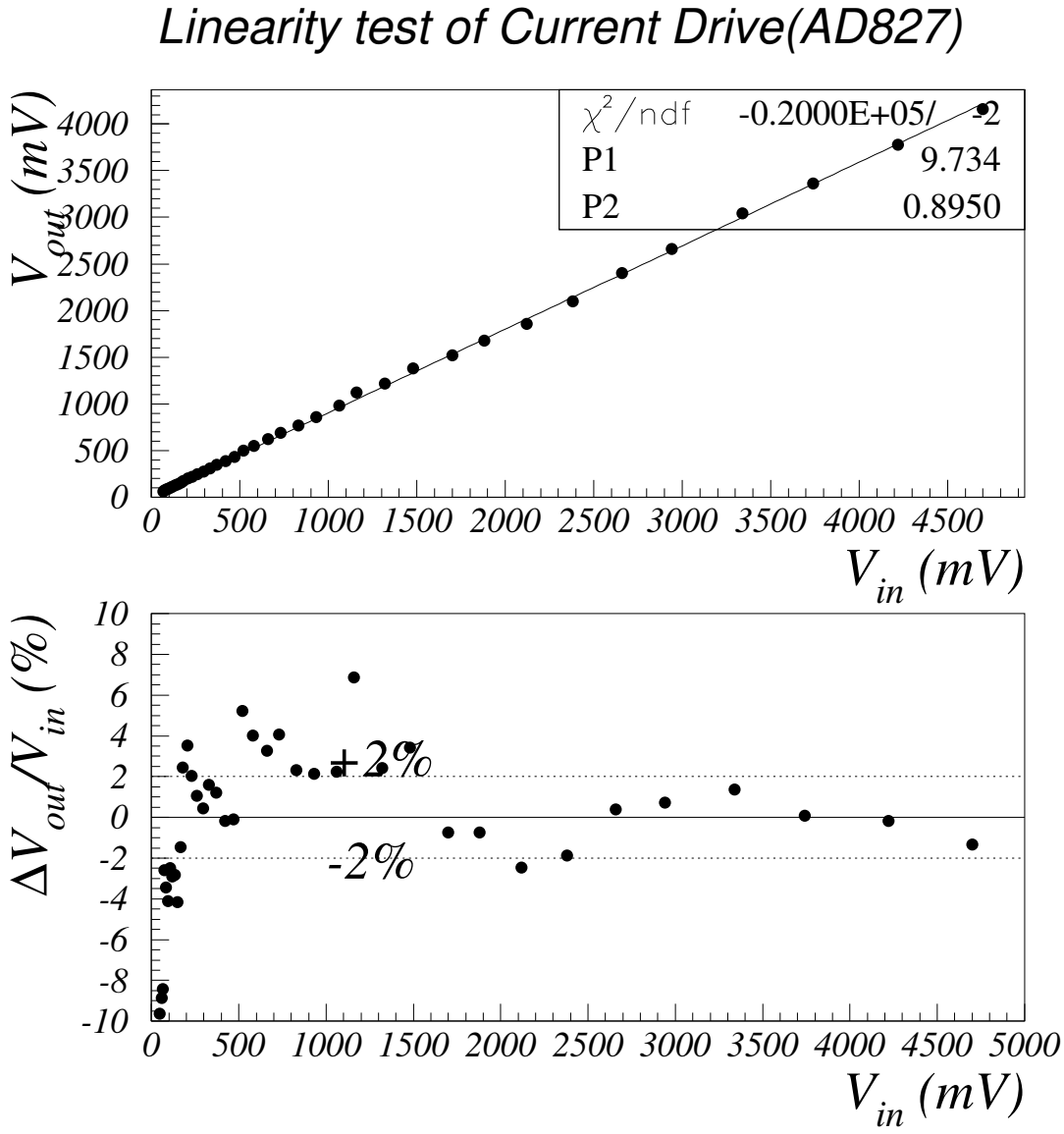


図 5.7: トランジスタによる回路の線形性

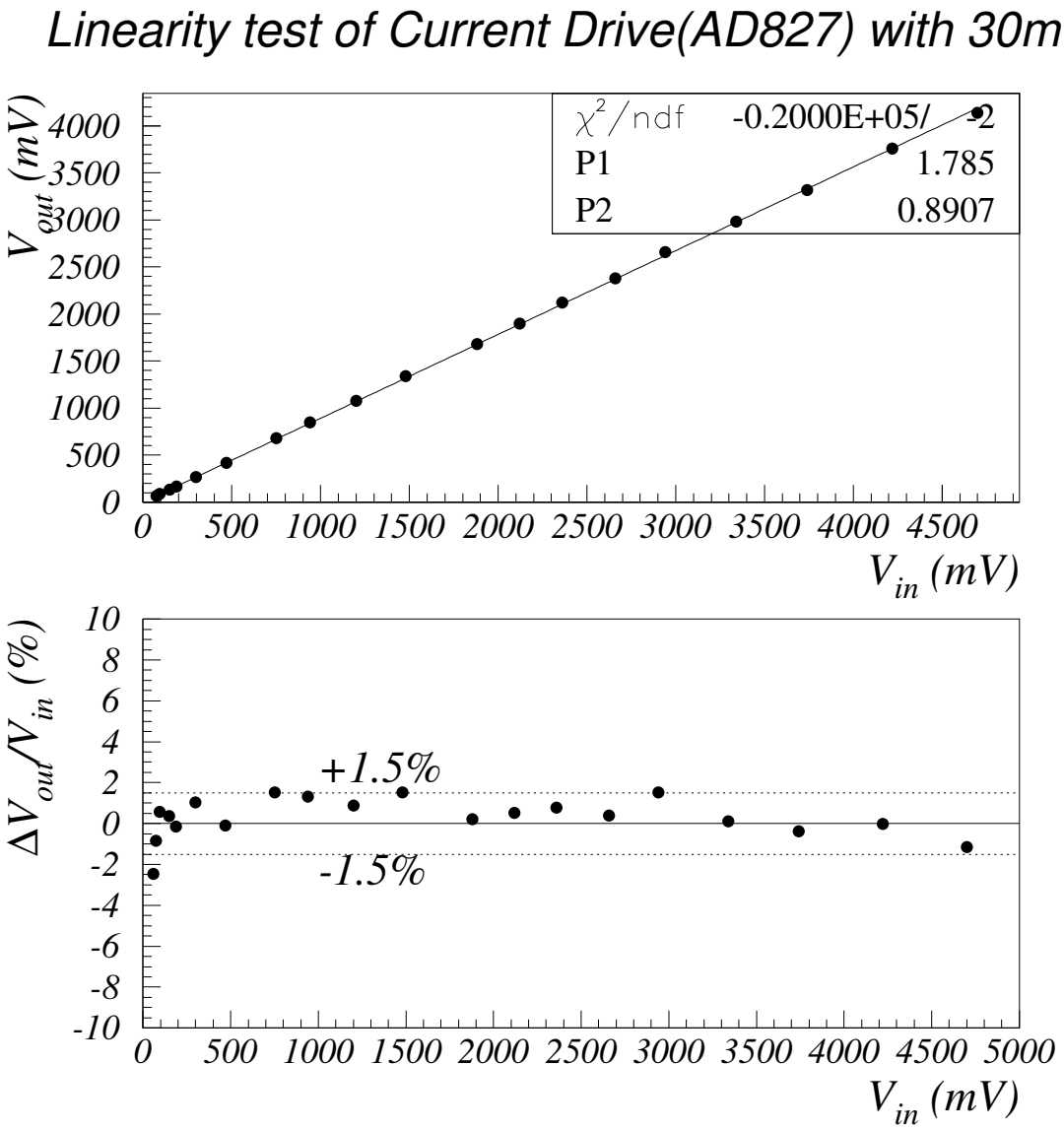


図 5.8: 30m のケーブルによる信号伝送の線形性

### 5.4.3 臨界周波数

連続するテストパルスの間隔を短くしていった時の出力波形の様子を図 5.4.3 に示す。左図は連続するパルスの間隔が $7\mu sec$ の時、右図は $5\mu sec$ の時である。

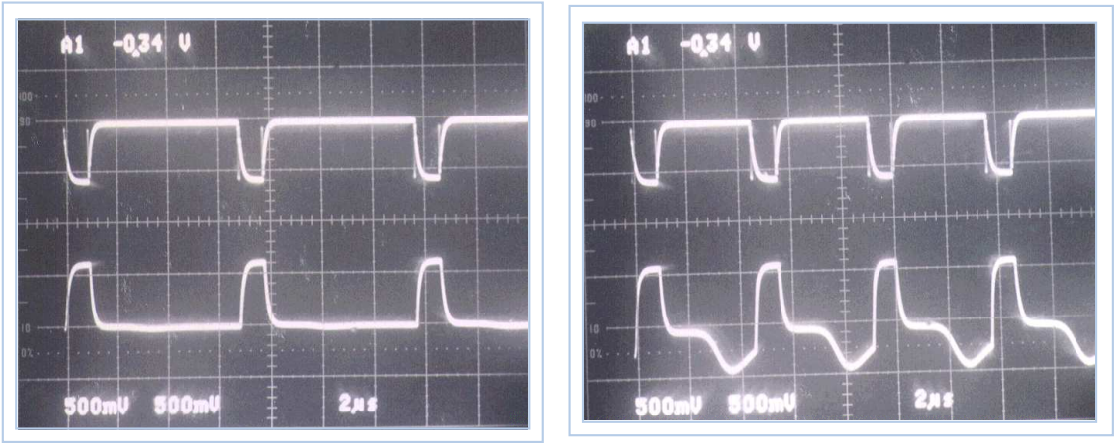


図 5.9: 入力信号の周波数により波形が変化する様子。 a 左: 周波数 140kHz のとき 右: 周波数 220kHz のとき

間隔が $5\mu sec$ の時には出力波形に明らかな歪みが見られる。この歪みが見えはじめる周波数 $f_{cri} = 1/(\text{パルスの間隔})$ をここでは臨界周波数と呼ぶ。この臨界周波数は信号の幅や大きさに依存をすることがわかっている。信号の幅や大きさを変えた時の臨界周波数の値を図 5.4.3 に示す。

入力信号の幅が広いほど、また入力信号が大きいほど臨界周波数が低くなることがわかる。実際の実験条件で STM から送られてくる信号の幅は約 $2\mu sec$ である。この幅であれば、 AAA の最大入力電圧である 4V($= 8GeV$) に対しても、 13kHz の頻度までは問題ないことが測定結果よりわかった。このような大きな信号が一個のカウンターを鳴らす頻度は、最も頻度の高い前方部のカロリメータでもせいぜい 100Hz なので問題ないといえる。

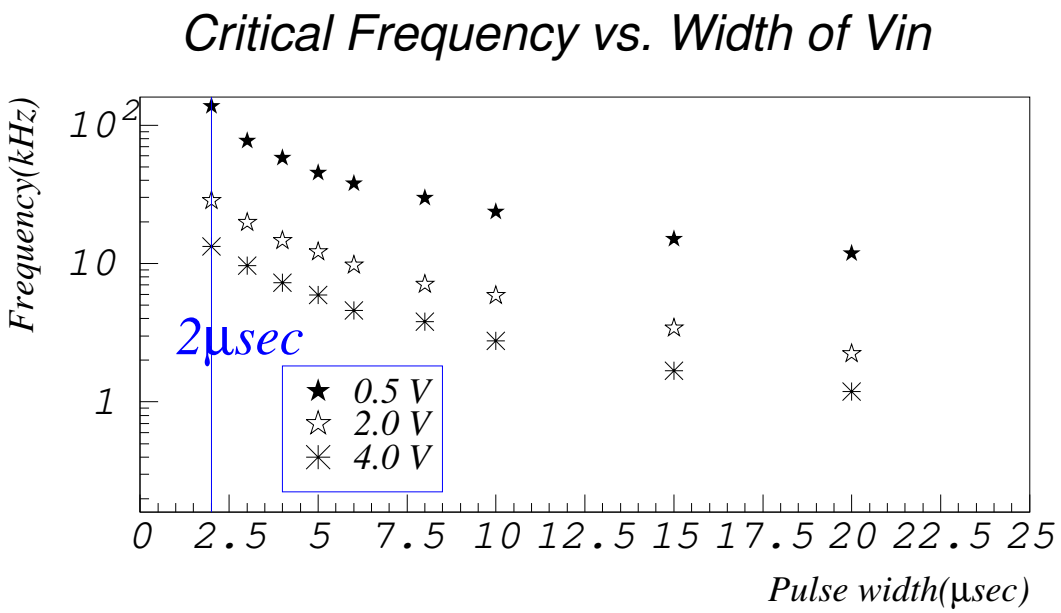


図 5.10: 臨界周波数

### 5.4.4 ノイズ減少に関するテスト

先に述べたように、電流駆動方式の利点は接地 (GND) 電位差によるノイズを減少できることである。ここでは信号を受ける側の GND 側に発振器から疑似ノイズを入力して、出力にどのような影響があるか実際に測定を行った。

このテストで気をつけなければならないことは、出力側のモジュールと信号受け側のモジュールの GND が絶縁されていなければならないということである。特に、同軸ケーブルや 3 足のプラグには十分注意する必要がある。思わぬところで系はつながってしまう。

テストセットアップを図 5.11 に示す。

図 5.12 は GND 側に入力した疑似ノイズ及び出力側の様子である。ノイズを 3V 入れた時、出力側に ～ -5mV 程度のうねりが見えていることがわかる。図 5.13 にノイズ信号の周波数を変えた時の減衰率の変化を示す。

ノイズの減衰率は、周波数 1kHz 以下で $\frac{1}{600}$ 以下という非常に良い結果が得られた。周波数の高い領域では悪くなっているが、それでも 100kHz で $\frac{1}{10}$ であり、コモン・モード・ノイズで一番問題となるのが交流によるノイズ ($f = 50$ないし$60Hz$) なので何ら問題はない。

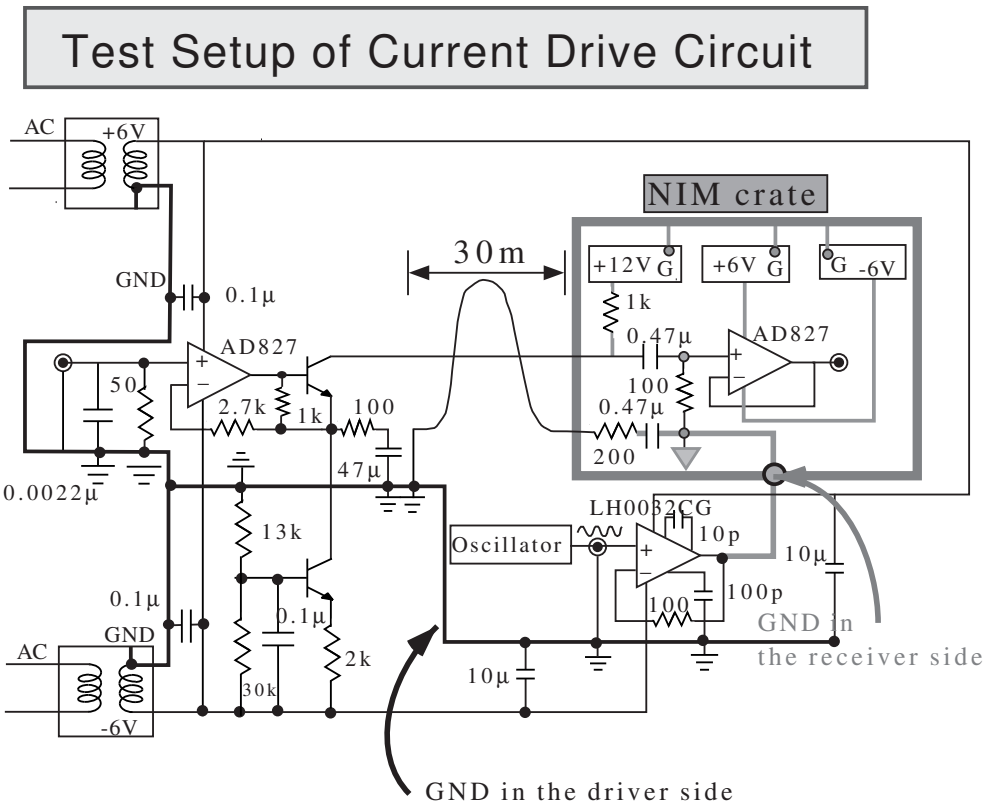


図 5.11: ノイズ減衰テストのセットアップ

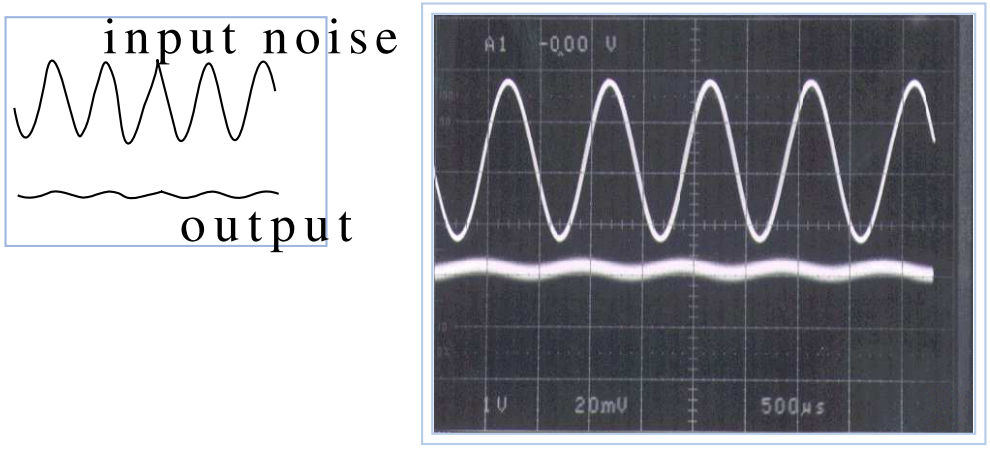


図 5.12: ノイズ減衰

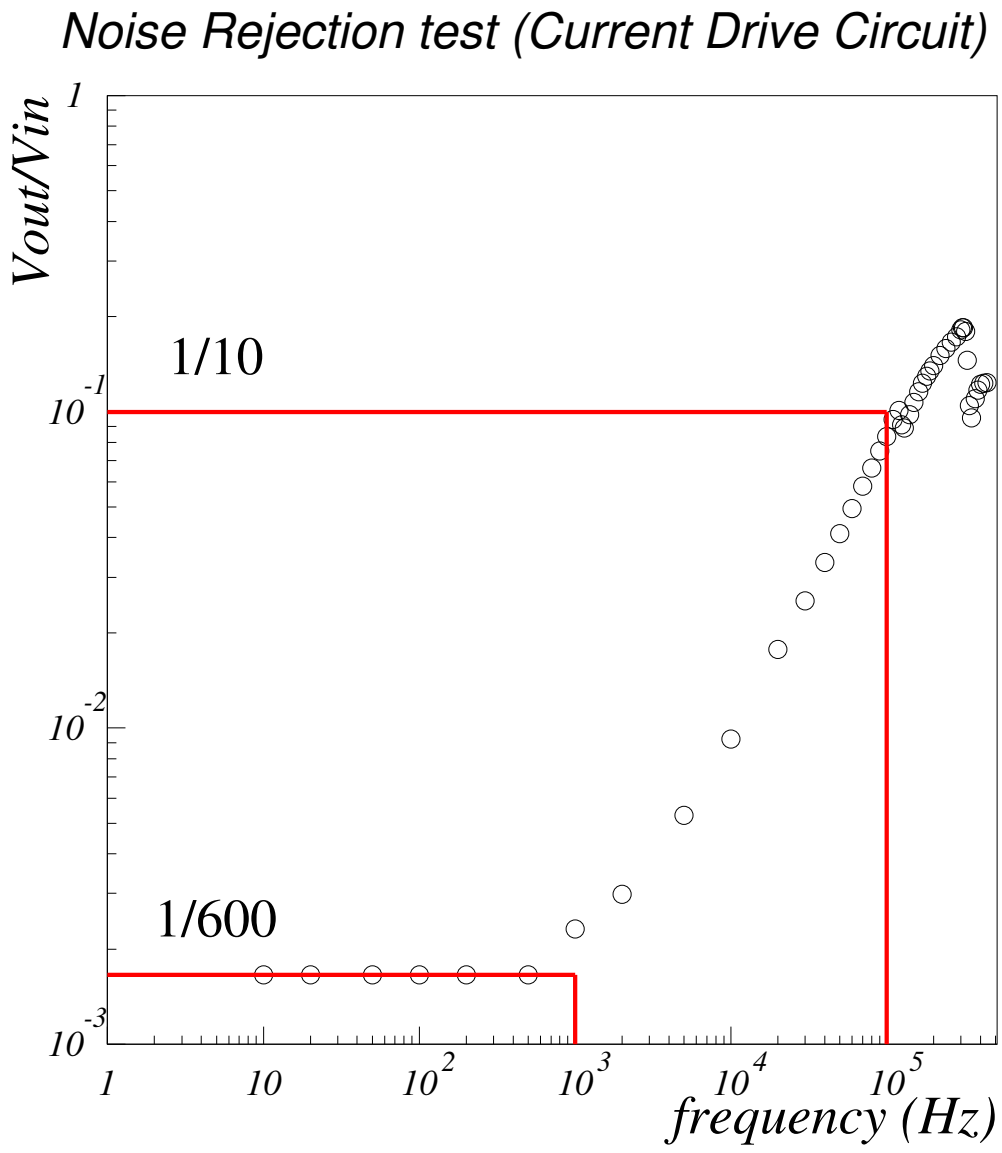
Noise Rejection test (Current Drive Circuit)
Vout/Vin
1
10^-1
10^-2
10^-3
1/10
1/600
1
10
10^2
10^3
10^4
10^5
frequency (Hz)

図 5.13: ノイズ減衰率

### 5.4.5 結論

以上のテスト結果から、アナログ信号の長距離伝送には電流駆動方式が非常に有効であることがわかった。これにより、接地電位差によるノイズの影響をほとんどなくすことが出来る。

よって、この方法を用いて実際に本番用のモジュールを作成した以下試作用に製作した本番用モジュールタイプ A 及びタイプ B のテスト結果を示す。

## 5.5 試作モジュールのテスト — タイプ A

本セクションでは、タイプ A のプロトタイプモジュールのテストについて報告する。図 5.14にモジュールの写真を示す。

### 5.5.1 モジュールの概要

アナログアッダータイプ A モジュールは独立した 4 つのチャンネルを有し、一つのチャンネルには 5 つの入力がある。各 5 入力は $\frac{1}{8}\phi$ リングに相当し、一枚のモジュールで 4 つの独立な $\frac{1}{8}\phi$ リングが形成される。

本モジュールの回路図を図 5.15 に示す。
タイプ A モジュールは次の 3 つのパートに分けられる。

- アナログサム部（入力バッファ）
- 反転バッファ
- 電圧—電流変換

各々のパートについて、説明する。

**アナログサム部**

構造自体は非常に簡単な、オペアンプによる利得 1 の増幅器の集合体である。5 つの増幅器を並列接続し、それをまた利得 1 の増幅器で受けることによって 5 つの信号のアナログサムが出来上がる。ここで、トリガーセル 5 個分のサム、つまり $\frac{1}{8}\phi$ リングが作られる。

**反転バッファ**

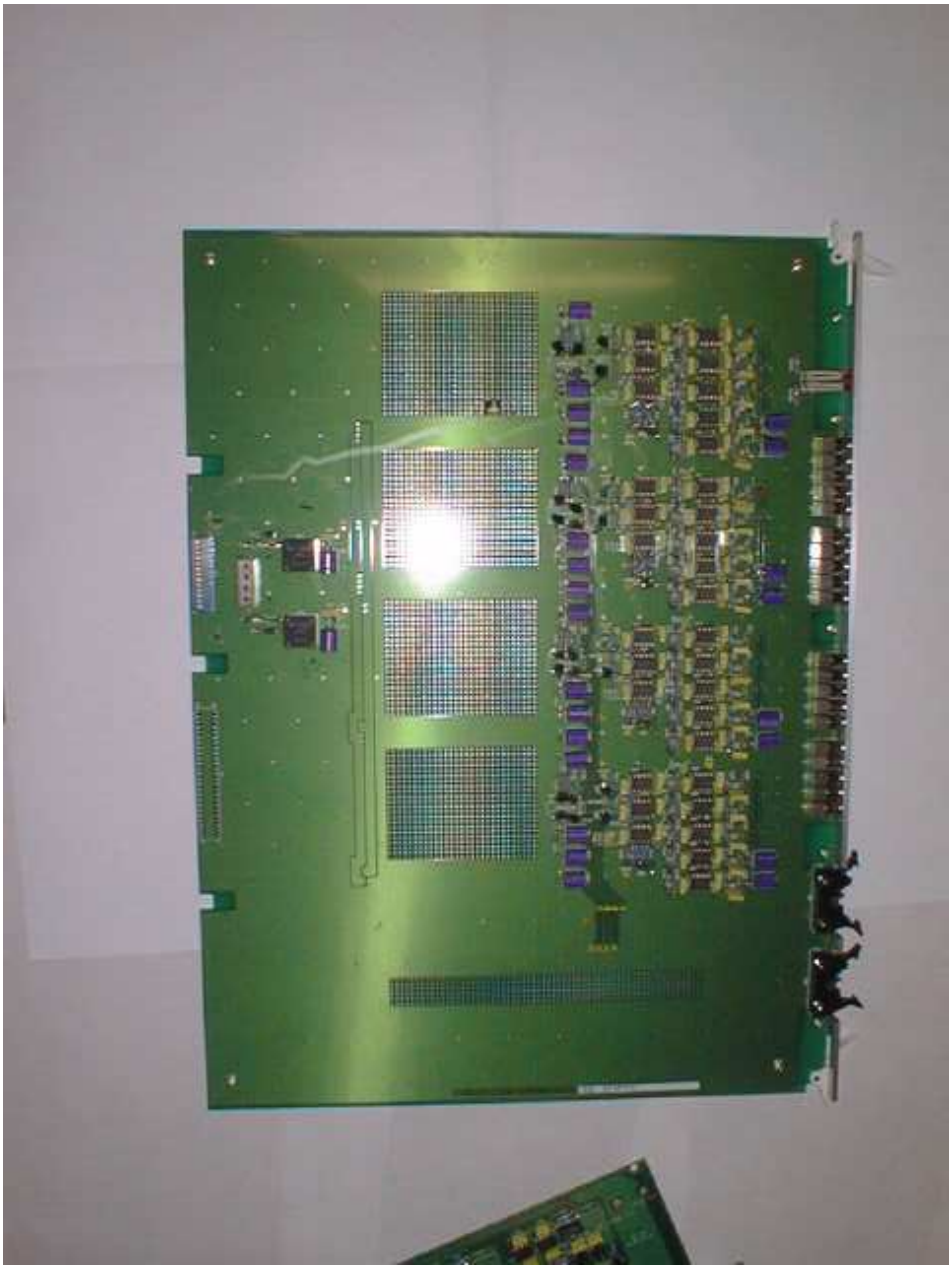

図 5.14: タイプ A モジュール全景

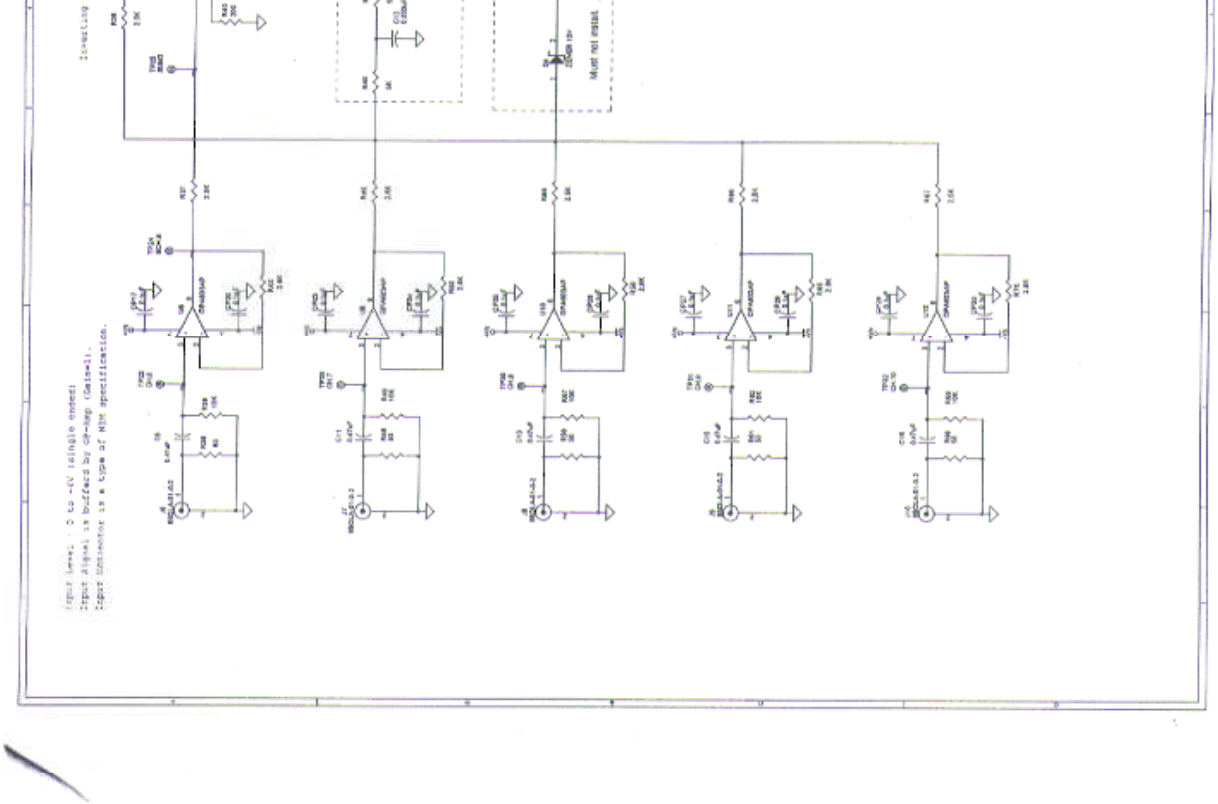

図 5.15: タイプ A 回路図

最終出力を負信号にするためにここで一度信号を反転させておく。オペアンプを用いた利得 1 の反転増幅器である。また、ダイナミックレンジの拡張のため、基準点を $+2V$ まで引っ張りあげる。これによって、$+2V \sim -4V$、計 $6V$ のレンジを得ることが出来る。

**電流 – 電圧変換**

セクション 5.4 でテストを行った電流駆動のための電流 – 電圧変換部である。

表 5.1 に本モジュールの特性をまとめておく。本モジュールは TKO サイズのモジュールで大きさは縦 cm 横 cm である。

線形性及び大きな信号に対する応答のテスト結果を以下に示す。

### 5.5.2 線形性

モジュールの 1 チャンネルに対し、$0 \sim -4V$ までの負パルスを入力し、線形性のテストを行った。入力パルスは STM からの出力に見たて、立ち上がり $1\mu sec$ 程度のものにした。

図 5.16 はタイプ A の入力と出力信号の写真である。上段が入力信号で、下段がレシーバー回路からの出力信号である。入出力が非常にきれいにほぼ一対一の大きさで出ていることがわかる。

線形性の測定結果を図 5.17に示す。入力信号 3V 程度までばらつきは 1.5% 程度で線形性が保たれている。

表 5.1: Analog Adder type-A の仕様

| | |
|---|---|
| ボード形状 | TKO Bus Module |
| 電源電圧 | $\pm 8V$ |
| 消費電力 | $750mW/+8V$ , $750mW/-8V$<br>但し、入力 open で、出力段に 100Ω 負荷の定常状態 |
| 入力 | LEMO Connector, Single End<br>Range $0 \sim -4V$<br>20 channels |
| 出力 | Hirose HIF3BD-10PA-2.54DS またはこれに準拠したもの<br>ツイストペア線 ×5 組<br>同一信号の 2 組の出力コネクタを持つ |

図 5.16: タイプ A の出力

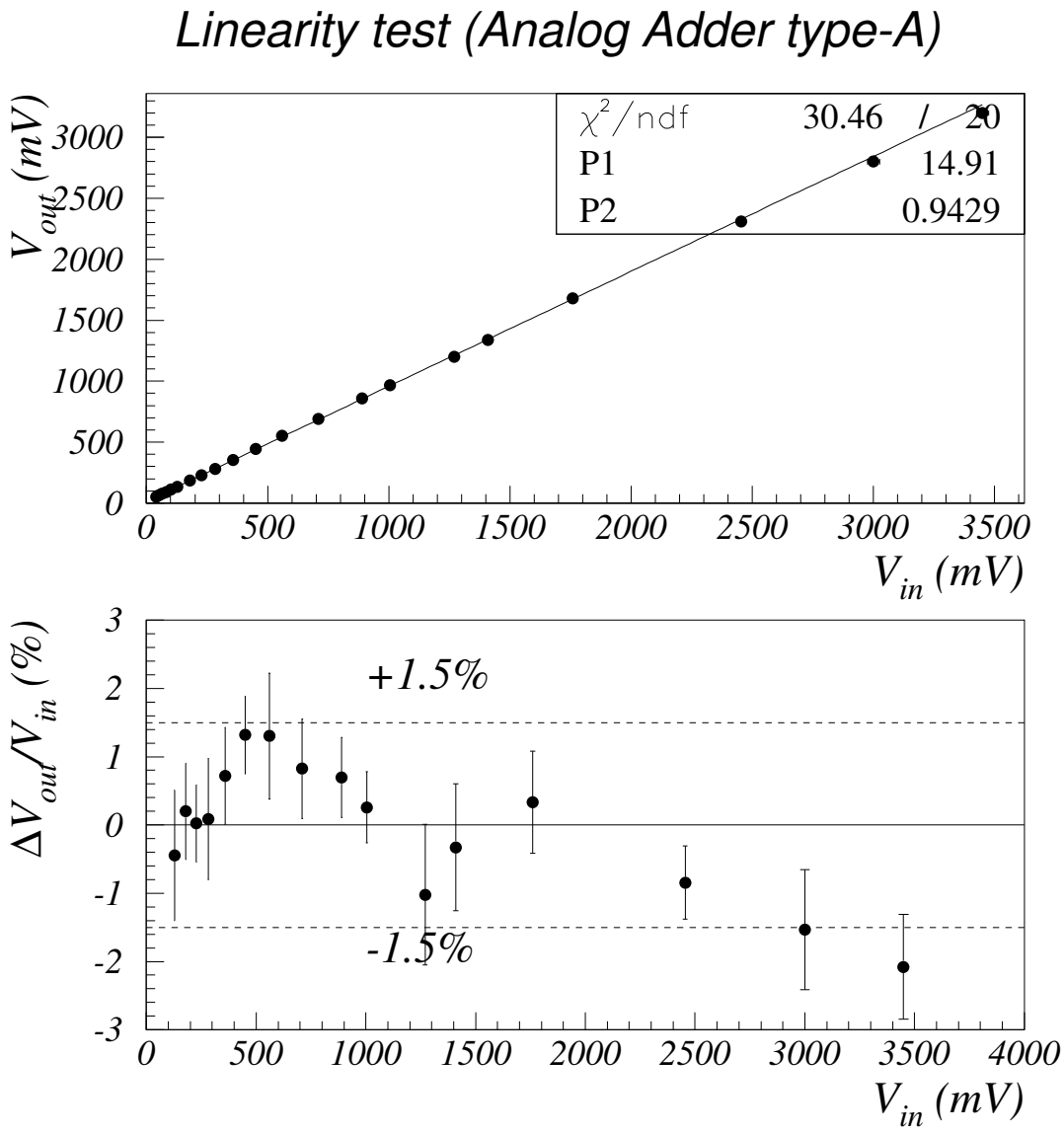


図 5.17: タイプ A の線形性

### 5.5.3 大きな信号に対する応答

各チャンネルに同一の信号を入力し、アナログサムが正常に行われているかどうか、また、アナログアッダーには非常に大きな信号が入ることも考えられるので、そのような時にモジュールの出力波形がどうなるかをチェックした。

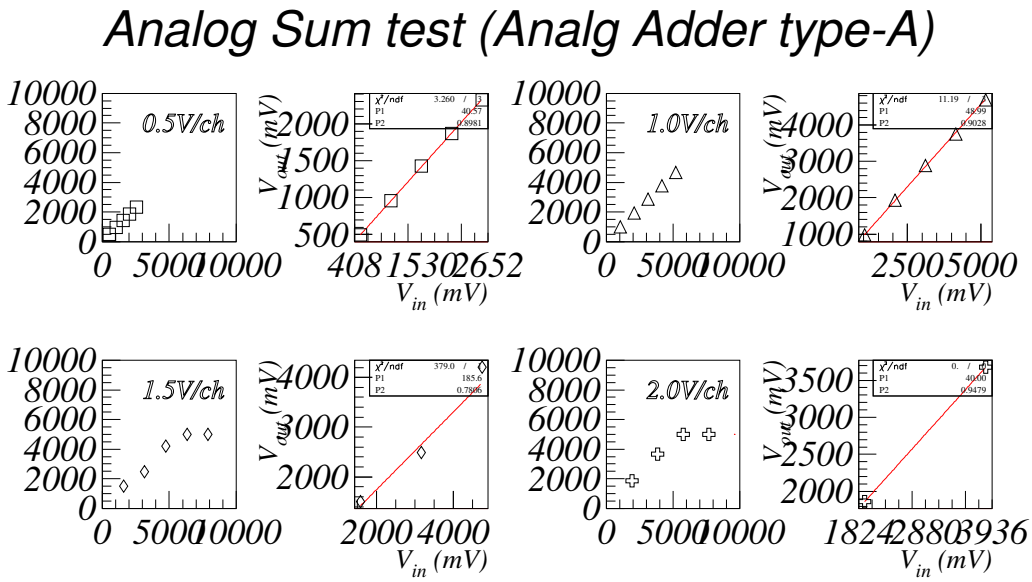


図 5.18: アナログ和

測定の結果、非常に大きな出力が入ってしまった時の応答は供給電力の限界によりサチュレートするだけで、信号が後ろに延びたりすることもなく特に問題のないことがわかった。図 5.19は 4 個の入力チャンネルにそれぞれ 4V 入れた時のアナログ和の出力波形である。

## 5.6 試作モジュールのテスト — タイプ B

タイプ B のプロトタイプモジュールのテストについて報告する。図 5.20にモジュールの写真を示す。

### 5.6.1 モジュールの概要

タイプ A モジュールから 4入力×8チャンネル の信号を受けるタイプ B は、 Base Board と Add-on Board の 2 枚一組からなる。入力はそれぞれの $\phi$ リング毎に分配

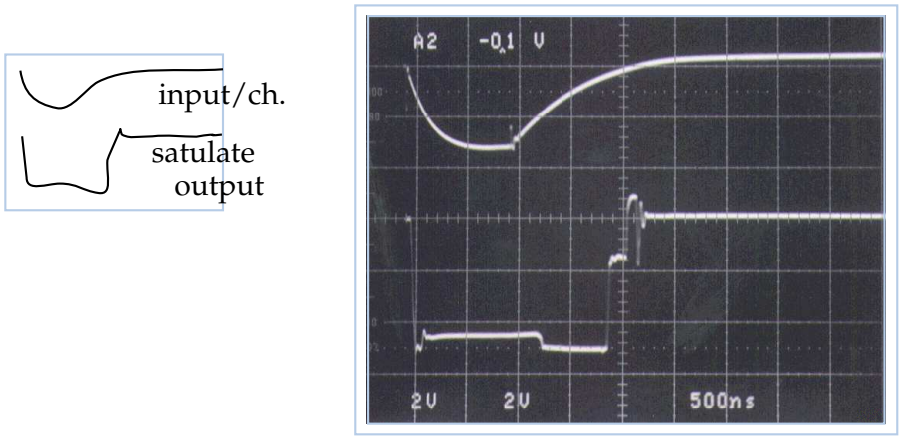


図 5.19: アナログ和のチェック

され、最終的に一組のモジュールから 4 つの $\phi$ リング和が出来上がる。

本モジュールの回路図を図 5.21 に示す。

構造はタイプ A と大体似通っていて、8 つの並列接続された利得 1 のオペアンプによる非反転増幅器の入力段、それを受ける反転バッファ、さらに出力でもう一度信号を反転させる。最終的な出力は、電流供給バッファを経て出される。タイプ B の信号送り先である EBM モジュールの入力インピーダンスが 50Ω であるため、4V まで信号を再現させるためには約 100mV の電流を流す必要がある。よって、この電流供給アンプが用いられる。

### 5.6.2 線形性

タイプ B モジュールの 1 チャンネルについて線形性のテストを行った。測定結果を図 5.22に示す。

必要な 90mV 以上 4V までの領域については、1% 精度で線形であるといえる。

### 5.6.3 クロストーク

クロストークとは、あるチャンネルに信号が入った時に別のチャンネルにその影響が出ることをいう。このようなことが起こると偽の信号が出ることになるので、このクロストークは十分小さくなければならない。

テストではタイプ B のチャンネル 1 にのみ信号を入力し、信号の入っていないチャンネル 2 の出力を見た。図 5.23 において上段の信号はチャンネル 1 出力、下段が 2

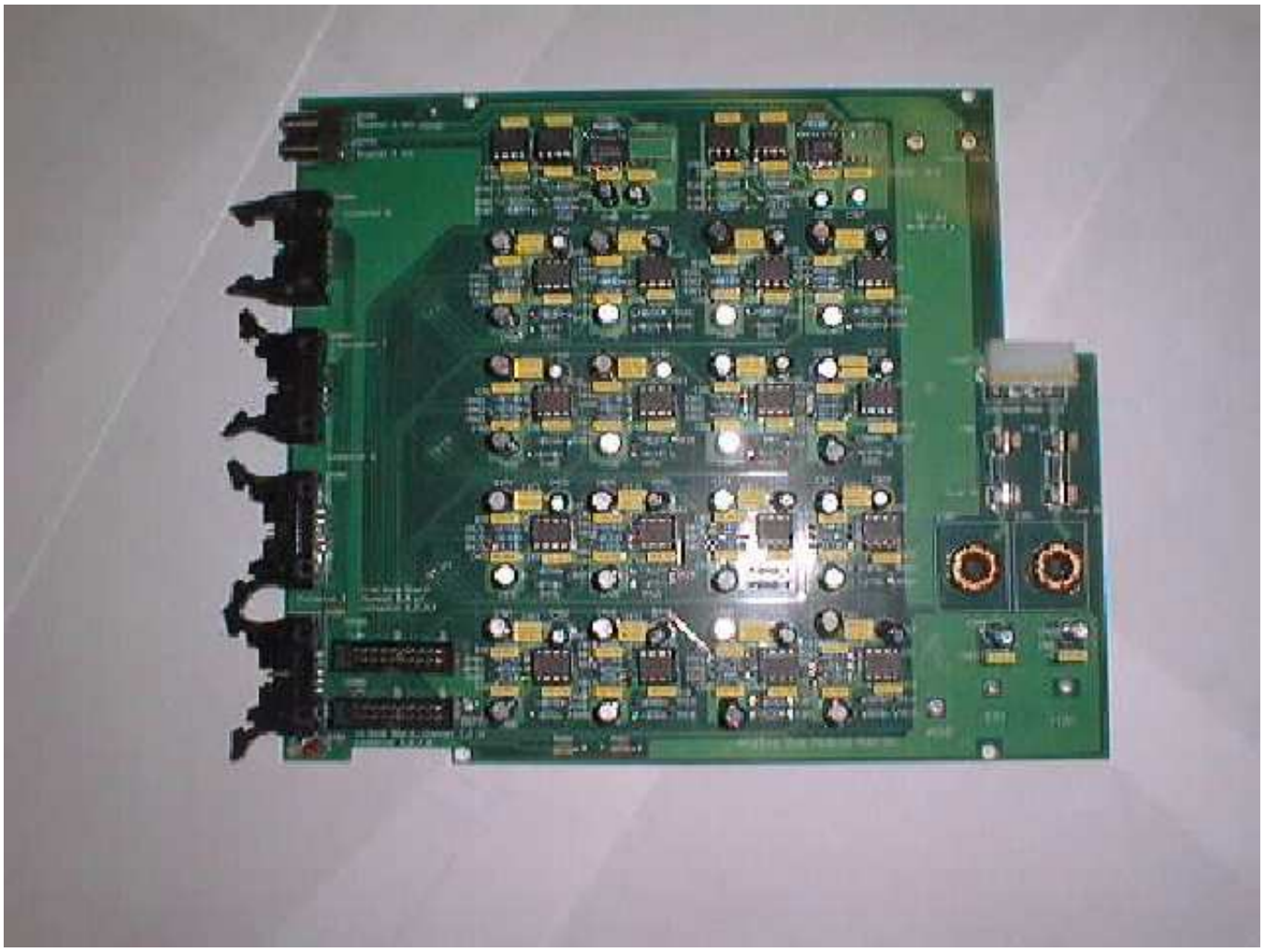

図 5.20: タイプ B モジュール全景

図 5.21: タイプ B 回路図

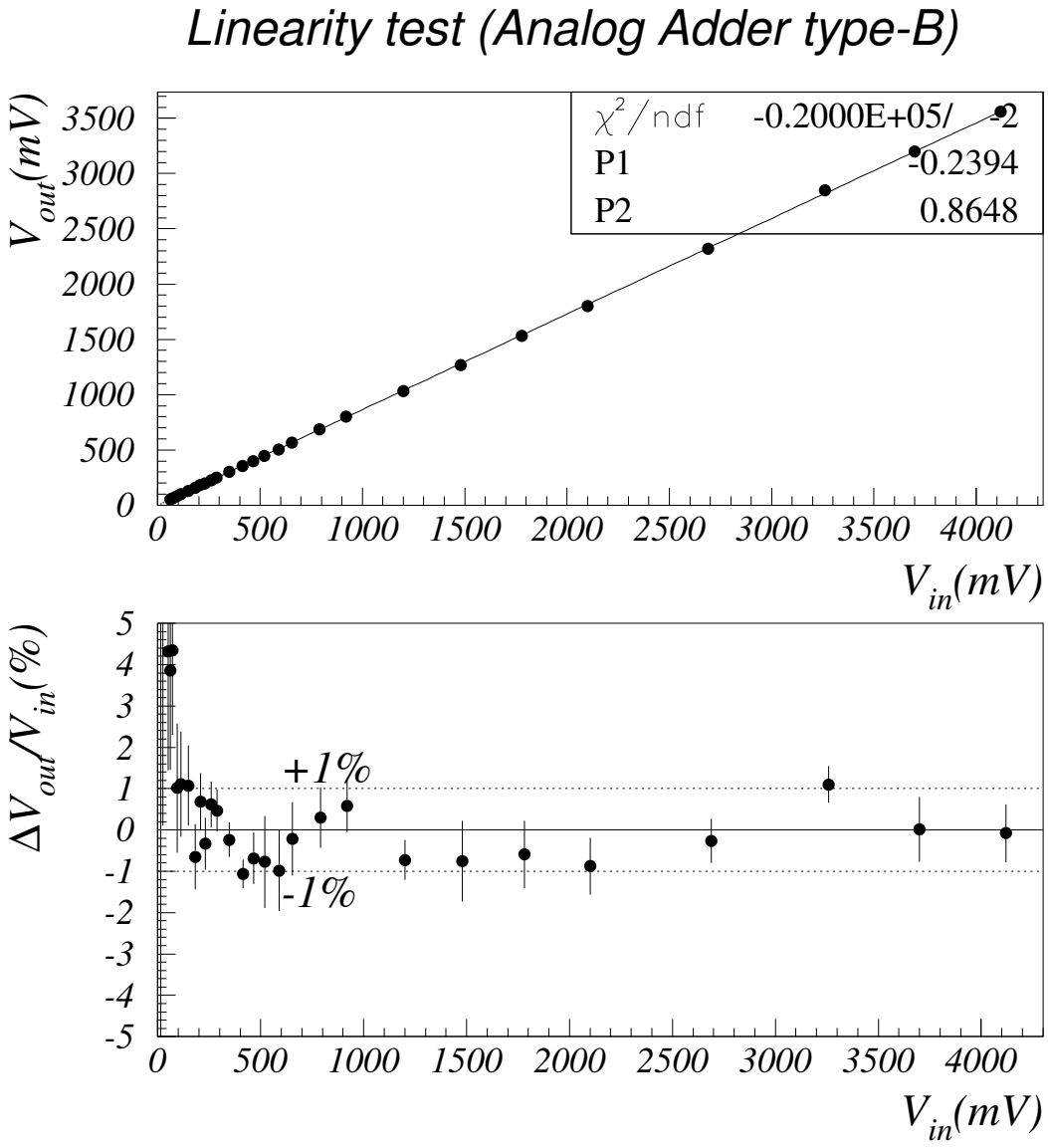


図 5.22: タイプ B の線形性

の出力である。図中には 1.8V に対して 40mV、つまり 2.2% 程のクロストークが見られる。

各点の電圧を詳しく調べみたところこのクロストークは全ての電源および GND ラインに現れていた。原因はこのモジュールの出力部についている電流供給バッファアンプで、信号によって大きな電流がこのアンプに流れた時に、電源電圧が動くことによって起こっていた。そこでバッファアンプの電圧ピンにコイルとコンデンサをつけることにした。電流供給バッファは電源ラインから大電流を引っ張ってくるため、ほんの少しの電圧の揺れが大きく出てしまう。コイルを介在させることによって積分回路による交流成分のカットオフを行い、電源ラインを通して信号が伝わってしまうのを防いだ。結果、クロストークは大きく改善されほぼ見当たらなくなった（図 5.24）この時のクロストークは % 以下である。

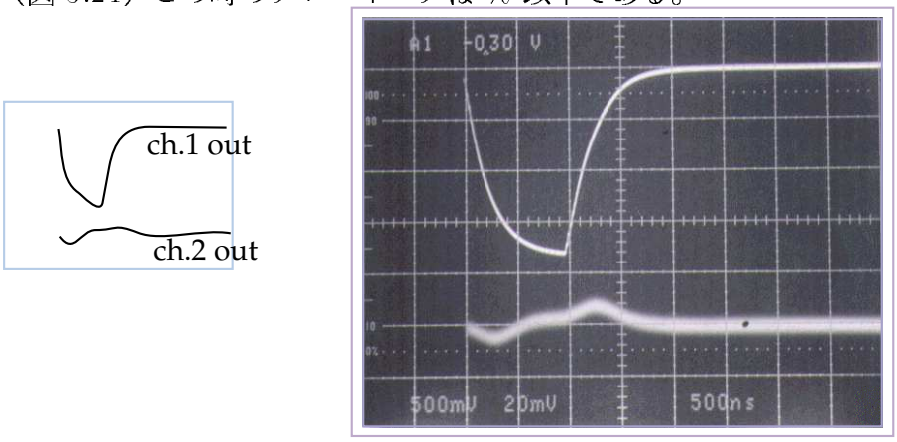


図 5.23: クロストーク

## 5.7 本番の状況に即したテスト

タイプ A とタイプ B の個々のテストでそれぞれの動作が確認できたので、今度は二つのモジュールをつなげた上で線形性の測定を行った。測定結果を図 5.25に示す。

ばらつきは 1% におさまっているので、非常に良い線形性を保っているといえる。

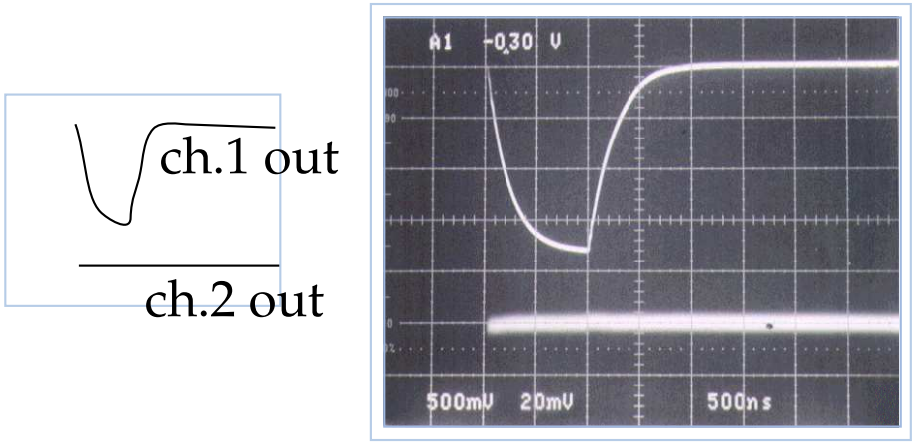


図 5.24: クロストーク

次はタイプ A とタイプ B を本番と同じような状況でテストするため互いに隔離された系に二つのモジュールを置き、30m のツイストケーブルで二つを接続して測定を行った。GND 間も同じくツイストケーブルで接続する。

線形性は 1.5% 程度の精度で保たれている。ケーブルによる信号の減衰率は、図 5.25 とのゲインの比較から、$0.7731/0.7824 = 0.988$、1.2% 程度である。

## 5.8 結論

アナログアッダーモジュールの性能について種々のテストを行った結果、これらのモジュールは長距離伝送においてノイズを十分に落としつつ、アナログ和を形成できることが確かめられた。アナログ和を形成する際、ダイナミックレンジを超すものが入力された場合もモジュールは壊れることなく、ただその供給電力の限界により信号がサチュレートするだけであることも確かめられた。また、要求される読み出しの頻度にも耐えられることがわかった。

以上より、これらのモジュールは ECL のトリガーシステムにおいて、全エネルギートリガーを作るのに適したモジュールであると結論付けられる。今後本モジュールを大量生産 (タイプ A-40 台)(タイプ B-5 台) し、本番に備える予定である。

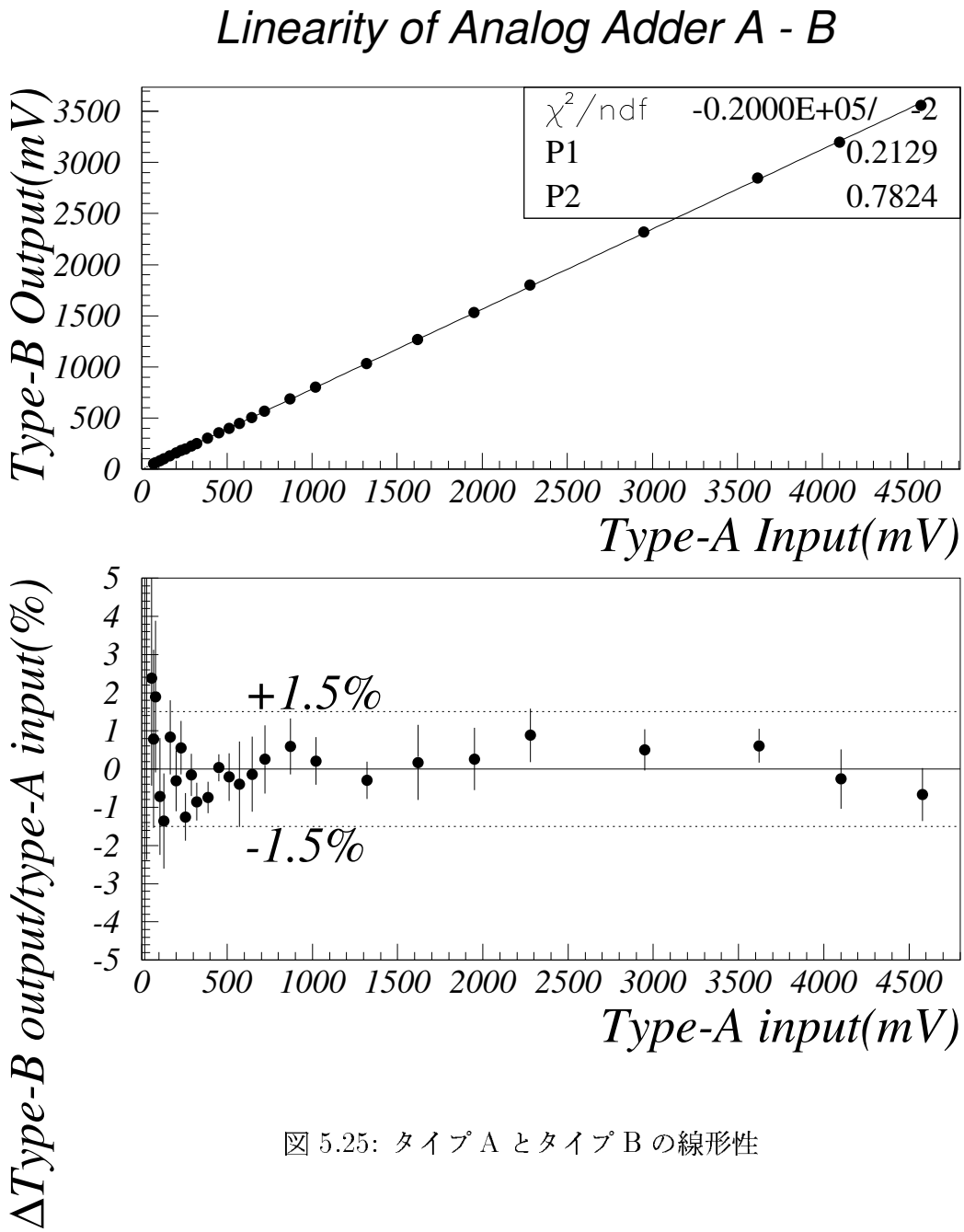


図 5.25: タイプ A とタイプ B の線形性

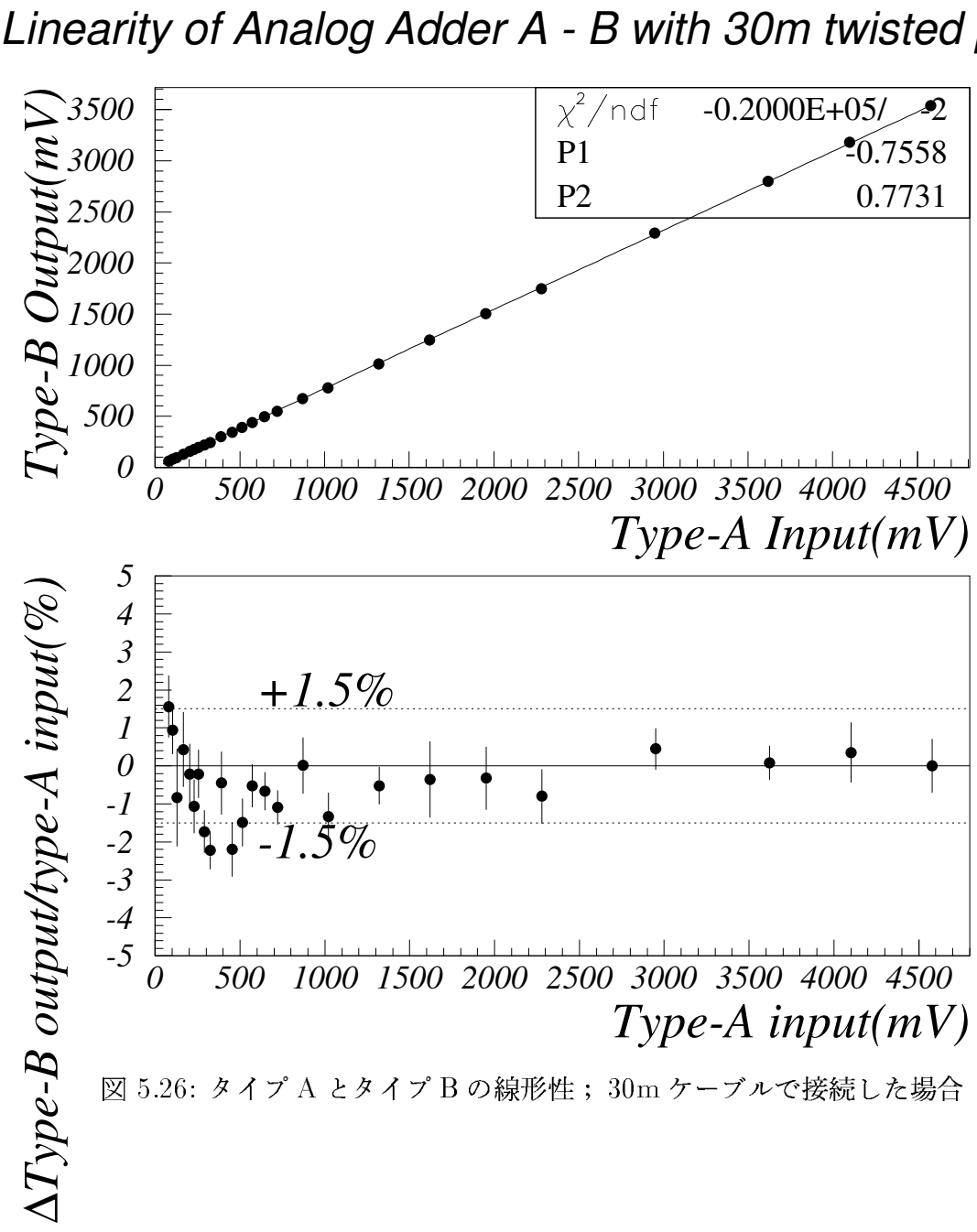


図 5.26: タイプ A とタイプ B の線形性； 30m ケーブルで接続した場合

# 第 6 章

# まとめ

最後に本論文のまとめを行う。

KEK-$B$ ファクトリーは、$B$ 中間子の物理を調べて CP 対称性の破れを測定し、小林·益川理論の検証を行う実験である。本論文では、CsI 電磁カロリメータのトリガーシステムについての報告を行った。

BELLE 実験のトリガーシステムで用いられる方法は、事象の発生毎に判定を行い、トリガー信号が出された時にデジタル化をはじめるというものである。そのため、各検出器は事象発生より $1.85\mu sec$ 以内に中央判定システムまでトリガー信号を送る必要がある。

奈良女子大学が、その建設に携わる CsI 電磁カロリメータは、物理事象の判定に非常に重要な役割を果たす。カロリメータ中に落とされた、電子、光子の全エネルギーによるトリガー信号や、16 本の結晶配列を基本単位としてトリガーセルを組み、その中で敷居値を超えたものの個数によるトリガー信号を出す。また、結晶の特別な組合せでエネルギーを測定し、Bhabha 散乱を識別し、頻度を下げてトリガー信号を出す。

CsI 結晶の信号は非常に遅いため、速い時間を要求されるトリガー信号を出すために、様々な努力がなされた。速い信号を出すということは、同時に個々のノイズがカットし切れないことを意味する。そのため、約 9000 本の結晶からの信号をそのまま足し合わせる全エネルギートリガーは、特にノイズに対して注意する必要があった。また、信号はアナログのままで加工されていくため、長距離の伝送に対する対策が必要となった。それをいかに解決してより性能の良いモジュールを作るかが、本研究の課題となった。

信号の伝送は接地電位差によるノイズを十分小さくすることができる電流駆動方式が採用された。本研究では、試作モジュールに様々なテストを行い、非常に良い

結果を得た。これら、アナログアッダーモジュールはカロリメータトリガーの要求を十分に満たして動作することが結論付けられた。

# 参考文献

[1] Phys.Rev.Lett.vol.13(1964)138-140pp

[2] M.Kobayashi and T.Maskawa ,Prog.Theor.Phys.**42**(1973)652.

[3] A.B.Carter and A.I.Sanda,Phys.Rev.Lett.45(1980)952,Phys. Rev.D23(1981)1567.I.I.Bigi and A.I.Sanda,Nucl.Phys.B193(1981)85.

[4] L.Wolfenstein , Phys,Rev.Lett.**51**(1983)1945.

[5] 岩田正義 et al, 日本物理学会誌 Vol49,No9,(1994)718

[6] B Study of CP Vioration in B Messon Decays Technical Design Report(1995)KEK Report 95-1

[7] Progress Report

[8] S.K.Sahu et al., EFC – A small angle BGO Calorimeter for BELLE, Belle-Note #203, Dec.,1997

[9] T.Iijima et al., Aerogel Čerenkov Counter for the BELLE Experiment, BELLE Preprint, Mar.,1996

[10] H.Kichimi et al., Design of the TOF Fromt End Electronics, Belle-Note #138, Sep.,1996

[11] Y.Sakai, Trigger Overview ,BELLE Trig/DAQ workshop '97 transparency

[12] M.Yamauchi, BELLE DAQ System , BELLE Trig/DAQ workshop '97 transparency

[13] 大嶋康伸, B ファクトリー電磁シャワーカロリメータのテストビームによる性能評価,1994 年度修士論文

[14] A.Satpathy et al. , Energy Resolution of CsI(T$\ell$) Calorimeter Prototype. BELLE note-98, November 1995.

[15] 渡辺亜矢子,KEKB ファクトリー BELLE 測定器の電磁カロリメータに用いる CsI (Tl) 結晶の特性について,1996 年度修士学位論文

[16] 池田仁美, 電磁カロリメータに用いる CsI (Tl) 結晶のエネルギー較正,1995 年度修士学位論文

[17] T.W.Hur et al., A Simmulation Study for Calorimeter Trigger, Belle-Note #107, Jan.,1995

[18] T.W.Hur et al., Cosmic Ray Generator and Calorimeter Trigger Rate due to Cosmic Ray, Belle-Note #136, Oct.,1996

[19] BELLE Calorimeter Trigger Group, BELLE Calorimeter Trigger Version 1.0, Belle-Note #158, Dec., 1996

# 謝辞

本研究を行うにあたって、お世話になりましたたくさんの皆様方にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

常に鋭い御指摘で私を諭し、御指導下さった野口先生、良きアドバイスを下さった宮林先生には心から感謝致します。また、KEK-$B$ ファクトリーという大規模な実験に携わり非常に多くの方々と出会い、いろいろなことを学びました。このような機会を与えて下さった先生がたにはお礼の申しようもございません。

いつもいつも、明るく、やさしく、時に厳しく、常に私どものことを考えていろいろなことを教えて下さった林井先生は、どれだけ感謝の辞を述べても足りません。本当にありがとうございました。

そして、私をずっと支え続けていてくれた友人たちに心から感謝いたします。

最後になりましたが、研究室の皆様にも深くお礼を申し上げます。