第3章　Belle実験装置

KEKB 加速器は、CP 非保存を予言する小林益川理論を検証することを目的として建設された電子 · 陽電子衝突型加速器である。B 中間子反 B 中間子対を大量に生成するために、重心系のエネルギーは $\Upsilon(4s)$ 状態の 10.58GeV に設定されている[1]。

一般に加速器には、高いエネルギーを目指すものと、高いルミノシティを目指すものがある。KEKB 加速器は、大量の B 中間子反 B 中間子の生成を目的としているため高いルミノシティを実現するように設計されている。

KEKB 加速器は電子と陽電子のエネルギーが異なる非対称エネルギー、2 リング型の衝突型加速器になっており、これは B 中間子の崩壊点を精度よく測定するためである。

3.1　KEKB 加速器

B ファクトリーのような非対称エネルギー型の衝突型加速器では、電子と陽電子は異なったリング中に蓄積されなければならないため、2 リングが必要となる。実際の KEKB 加速器の全体図を図 3.1 に示す。KEKB では既存の周長 3km のトリスタンのトンネルの中に電子を蓄積する 8GeV のリングと、陽電子を蓄積する 3.5GeV のリングの 2 つリングを並べて設置されている。電子と陽電子は各々のリングの中を反対方向に周回する。2 つのリングは 2ヶ所で交差するが、そのうちの筑波実験棟中の 1ヶ所で電子と陽電子が衝突するようになっており、衝突点を囲んで Belle 測定器と呼ばれる大型の検出器が設計されている。

KEKB 加速器ではビーム輝度 (ルミノシティ) が最大となるように設計されている。ルミノシティ$\mathcal{L}$は、断面積 σ を持つ、反応の発生頻度 R が R=$\mathcal{L}\sigma$ となるように定義される。衝突型加速器において、ルミノシティーはつぎのような式により与えられる。

$$\mathcal{L} = 2.2 \times 10^{34} \xi (1+r) (\frac{E \cdot I}{\beta_y^*}) \ /cm^2/s$$

ここで、E はビームのエネルギー (単位：GeV),I は蓄積電流 (単位：A) である。また、ξ はビームチューンシフトと呼ばれる量であり、ほぼ 0.040 の値を持つ。r は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であり、β_y^* は衝突点で垂

[1] $\Upsilon(4s)$ は約 96%以上の確率で B 中間子反 B 中間子対に崩壊する

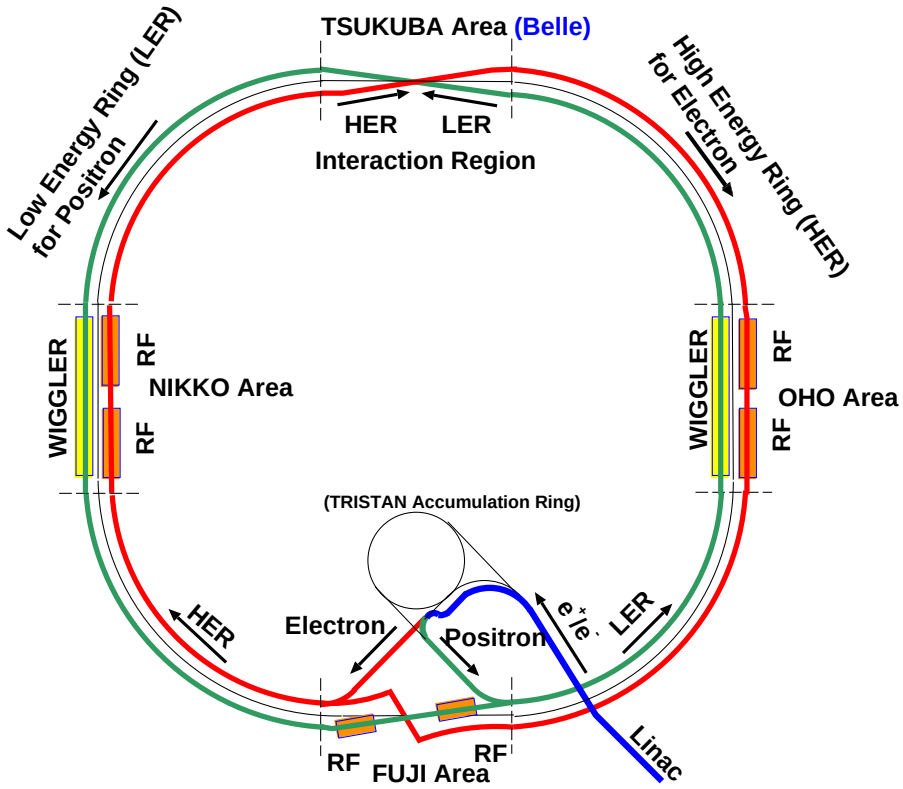

図 3.1: KEKB 加速器

表 3.1: KEKB 加速器のパラメーター

Ring	LER	HER	
ビームエネルギー (GeV)(e^+e^-)	3.5	8.0	GeV
周長 (m)	3016.26		m
ルミノシティ$(cm^{-2}s^{-1})$	1×10^{34}		$\mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$
ビーム交差角 (mrad)	± 11		mrad
ビームビームチューンシフト	0.039/0.052		
Beta function at IP (β_x^*/β_y^*)	0.33/0.01		m
ビーム電流 (A) (e^+e^-)	2.6	1.1	A
ビームエネルギーの広がり (MeV)	7.1×10^{-4}	6.7×10^{-4}	
バンチ間隔	0.59		m
バンチの数	5000		

直方向 (y 方向) にどれだけビームを絞れるかを表すパラメーターである。結局、ルミノシティを大きくするためには、ξ と蓄積電流を大きくし、β_y^* を小さくすれば良い。KEKB では、表 3.1 にあるように、$10^{34} cm^{-2} s^{-1}$ のビームルミノシティをめざしている。この目標を達成するためには、電子リングで 1.1A、陽電子リングでは 2.6A の電流を蓄積することが必要である。

KEKB 加速器のルミノシティは順調に上昇しており、衝突型加速器の中では、現在最強を誇っている。図 3.2 にルミノシティの状態を示した。

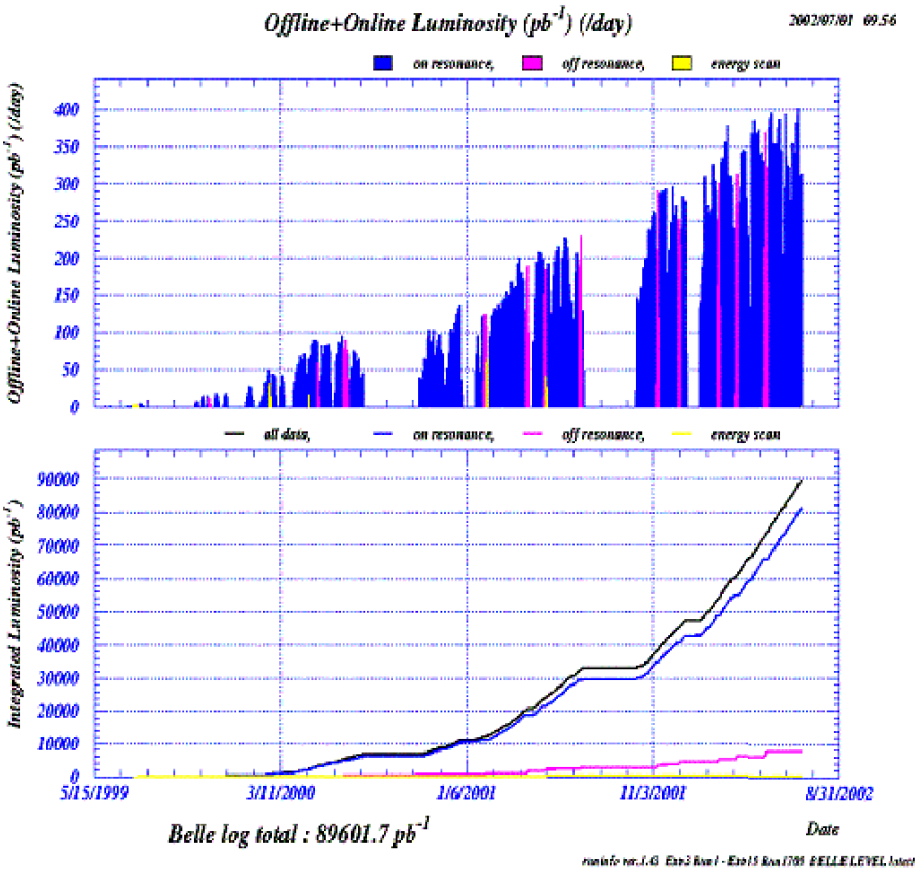

図 3.2: KEKB 加速器ルミノシティ

3.2　Belle 検出器

電子 · 陽電子の衝突で生成された B 中間子対が崩壊すると、荷電粒子と光子が平均 10 個づつ放出される。Belle 測定器は、これらの粒子を高い効率で検出し、かつ粒子の崩壊点や粒子の種類を区別する能力を持つように設計された大型の測定器である。Belle 測定器の全体図を図 3.3、断面図を図 3.4 に示し、表 3.2 に Belle 測定器中にくみこまれている各測定器の性能の一覧を示す。

ここで、Belle 検出器の座標軸は、ビームの衝突点を原点とし、電子のビームの方向を z 方向、鉛直上向を y 軸、この 2 つから右手系になるように x 軸をとっている。また、z 軸回りの回転角を ϕ、z 軸からの偏角を θ、z 軸からの距離を r($r = \sqrt{x^2 + y^2}$) とする。

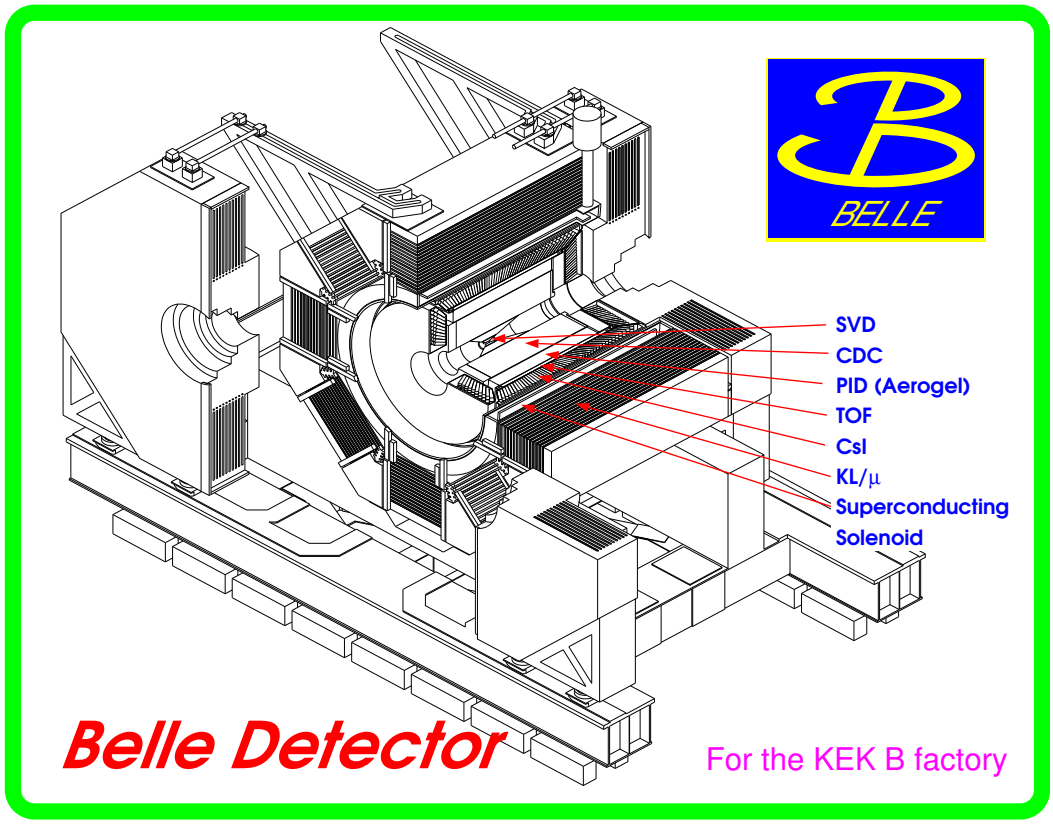

図 3.3: Belle 測定器

Detector	Type	Configuration	Readout	Performance
Beam pipe	Berylium double-wall	Cylindrical, r = 2.3 cm 0.5 mm Be/ 2 mm He /0.5 mm Be		
SVD	Double sided Si strip	300 μm thick, 3 layers r = 3.0 - 5.8 cm Length = 22 - 34 cm	ϕ: 41k θ: 41k	$\sigma_{\Delta z} \sim 105$ μm
EFC	BGO	2 cm × 1.5 cm × 12 cm	θ : 5 ϕ : 32	
CDC	Small cell drift chamber	Anode : 52 layers Cathode : 3 layers r = 8.5 - 90 cm -77 $\leq$ z $\leq$ 160 cm	A: 8.4k C: 1.5k	$\sigma_{r\phi} = 130$ μm $\sigma_z = 200 \sim 1{,}400$ μm $\sigma_{p_t}/p_t = 0.3$ % $\sqrt{p_t^2+1}$ $\sigma_{dE/dx} = 6$ %
ACC	n : 1.01 $\sim$ 1.03 Silica Aerogel	$\sim 12 \times 12 \times 12$ cm ^{3} blocks 960 barrel / 228 endcap FM - PMT readout	1,788 ch	$\mu_{eff} = \geq 6$ K/π 1.2 $\leq$ p $\leq$ 3.5 GeV/c
TOF	Plastic Scintillator	128 ϕ segmentation r = 120 cm, 3 m long	128 × 2 ch	$\sigma_t = 100$ ps K/π =up to 1.2 GeV/c
ECL	CsI	Tower structure $\sim 5.5 \times 5.5 \times 30$ cm^3 crystals Barrel : r = 125 - 162 cm Endcap : z = -102 and +196 cm	6,624(B) 1,152(FE) 960(BE)	σ_E/E $= \frac{0.066(\%)}{E} \oplus \frac{0.81(\%)}{E^{1/4}} \oplus 1.34(\%)$ $\sigma_{pos} = 0.5$ cm / $\sqrt{E}$ E in GeV
MAGNET	super conducting	inn.rad. = 170 cm		B = 1.5 T
KLM	Resistive plate counter	14 layers (5 cm Fe + 4 cm gap) 2 RPCs in each gap θ and ϕ strips	θ: 16k ϕ: 16k	$\Delta\phi = \Delta\theta = 30$ mrad for K_L $\sigma_t = 1$ ns 1 % hadron fakes

表 3.2: Belle 検出器のパラメータ

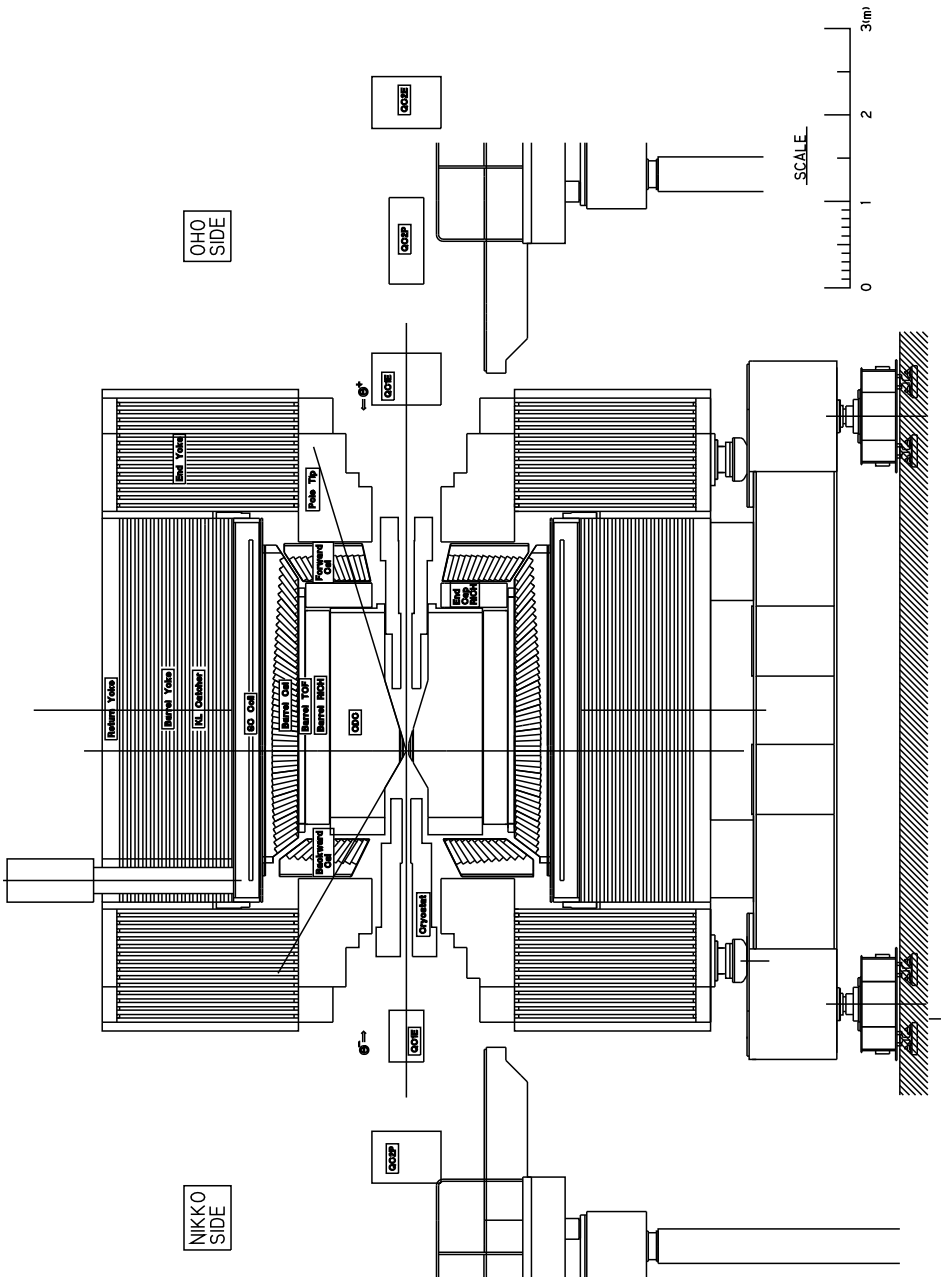

図 3.4: Belle 測定器の構造

3.2.1 粒子崩壊点測定器 (SVD;Silicon Vertex Detecter)

シリコン · バーッテクス · ディテクター (SVD) は、最もビーム衝突点の近くにおかれた測定器で、短い寿命 $(10^{-10} \sim 10^{-13} sec)$ をもつ粒子の崩壊点を測定するための測定器である。粒子の崩壊点の測定は B 中間子のみでなく、D 中間子や τ レプトンの物理の研究を行う上でも非常に重要である。本測定器は、崩壊点の z 方向の分解能 $\sigma_z \sim 100\mu m$ を達成している。SVD はその外側に位置する中央飛跡検出器 (CDC) と共に粒子の飛跡を検出し、運動量を精度良く測定する役割を担っている。

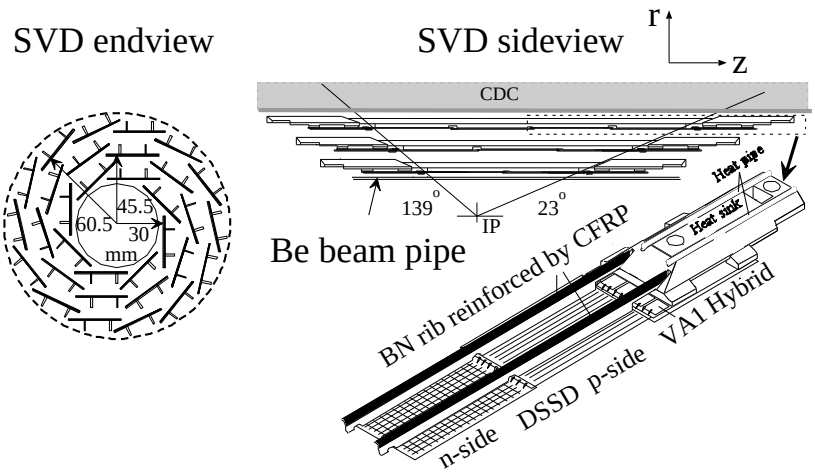

図 3.5: SVD の構造

図 3.5 は SVD の側面図と断面図である。バレル部分は 3 層になっておりビーム軸との角度が $23^\circ < \theta < 139^\circ$ の範囲を覆っている。また各々の層の半径は、内側から 30mm,45.5mm,60.5mm になっており、独立なラダーから成る。各々のラダーにはシリコンストリップ検出器 (DSSD) があり、内側の層から 8,10,14 枚でビームパイプを取り囲んでいる。シリコンストリップ検出器 (DSSD) とは厚さ 300μm のシリコン板に幅 6μm の電極を 25μm 間隔に張付けたものであり、この上下面の電極に逆バイアスの電圧をかけることによって、電極間を荷電粒子が通過する際に生じる電子ホール対を各電極に集め、信号として読み出す。

3.2.2 中央飛跡検出器 (CDC;Central Drift Chamber)

荷電粒子の飛跡や運動量の正確な測定が、中央飛跡検出器 (CDC) の重要な役割である。ソレノイドが作る 1.5T の磁場中で荷電粒子は、螺旋した飛跡を描き, 飛跡の長さ (xy 平面での半径 $\updownarrow$) を検出することで荷電粒子の横方向運動量 (p_t) を以下の式で求めることができる。

$$p_{t[GeV/c]} = 0.3 B_{[T]} \updownarrow_{[m]}$$

ここで、$\updownarrow$ は螺旋の半径である。また z 方向の運動量は螺旋のピッチから与えられる。また CDC では、荷電粒子のエネルギー損失 (dE/dx) を測定することにより、荷電粒子の種類を識別する能力を備えている。図 3.6 に CDC で測定された、エネルギー損失を荷電粒子の運動量の関数として示す。エネルギー損失は粒子の種類に依存せず速さ $(\beta = v/c)$ で決まる。異なる種類の粒子は最小のエネルギー損失となる運動量が違うため、異なる曲線を与える。横方向の運動量分解能は $\frac{\sigma_{p_t}}{p_t} = 0.3\% \sqrt{p_t^2 + 1}$ (p_t の単位は GeV)、dE/dx の分解能は $\frac{\sigma}{dE/dx} = 6\%$ を達成している。これを用いて、検出した荷電粒子がどの曲線に近いかにより、その粒子の識別が可能である。

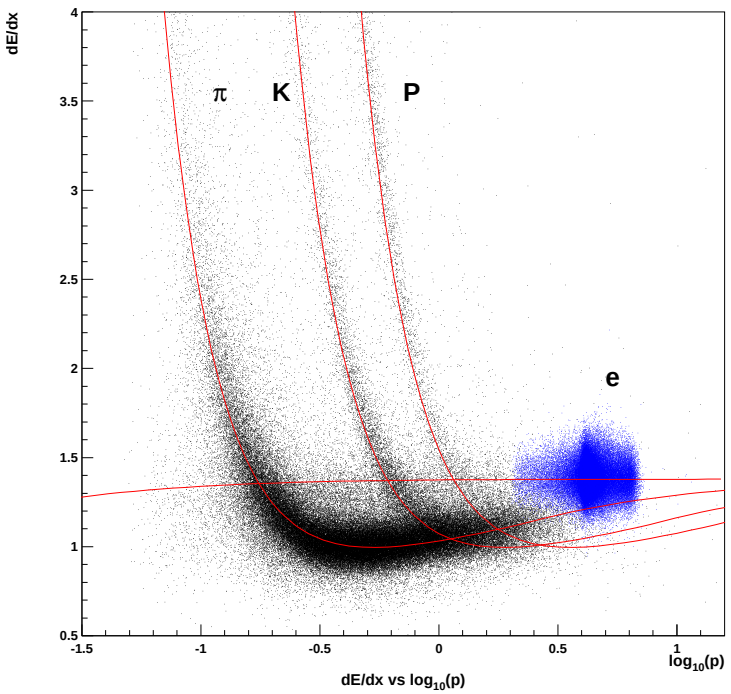

図 3.6: エネルギー損失。 荷電粒子の種類ごとのエネルギー損失を運動量の関数として示した図。

CDC の構造は、図 3.7 にあるように、外径が約 88cm、長さ約 235cm の円筒形で、衝突点に対して $17° \leq \theta \leq 150°$ の領域をカバーしている。Z 方向に非対称になっているのは、ビームのエネルギーが電子と陽電子とで異なっていることを考慮しているためである。また前方や後方など半径 r の小さいところ[2]では、運動量の小さな粒子に対するアクセプタンスをより大きくするために円錐形になっている。内部は 3 層のカソードワイヤーと 50 層

[2]半径 r が 30cm よりも小さいような領域。

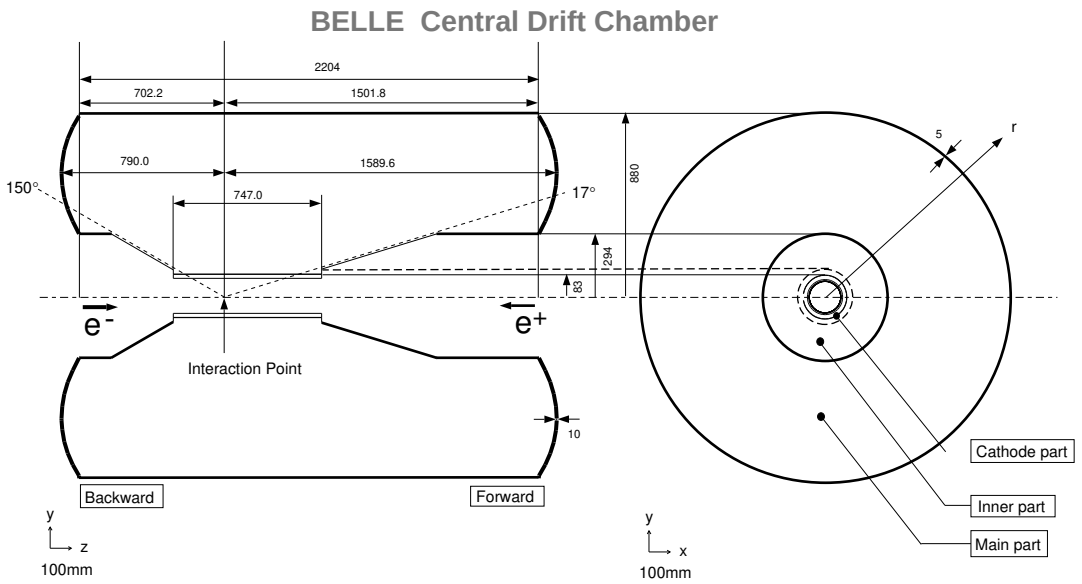

図 3.7: CDC の構造

のアノードワイヤーで構成され、後者は陽電子ビーム軸に平行に張られたアクシャルワイヤーと、Z 方向の位置測定能力を上げるためにビーム軸に対して約 50_{mrad} の角度をつけて張られたステレオワイヤーとの 2 種類から成る。各々のドリフトセルはほぼ正方形の形をしており、内側の 3 セルを除けばドリフトする最大の距離は $8_{mm} \sim 10_{mm}$ で半径幅は $15.5_{mm} \sim 17_{mm}$ である。読み出しはアノードワイヤーとカソードストリップで行われる。

3.2.3 エアロジェルチェレンコフカウンター (ACC;Aerogel $\check{C}$erenkov Counter)

エアロジェル・チェレンコフカウンター (ACC) の役割は $K^{\pm}$ と $\pi^{\pm}$ とを識別することである。荷電粒子が ACC を通過するとその粒子速度 v と光速の比 $\frac{v}{c}$ がエアロジェルの屈折率 n に対して、

$$\frac{v}{c} > \frac{1}{n}$$

の時、チェレンコフ光を出す。図 3.8 に示すように、異なった屈折率のエアロジェルを用いることにより、$1.2 \sim 3.5 GeV/c$ の領域で $K^{\pm}$ と $\pi^{\pm}$ を識別することができるように設計されている。この運動量領域で荷電粒子が $\pi^{\pm}$ であれば、チェレンコフ光を出し、K であればチェレンコフ光を出さない構成になっている。

図 3.8 のように ACC は Belle 検出器の中央部分に位置する。ACC のバレル部分には ϕ 方

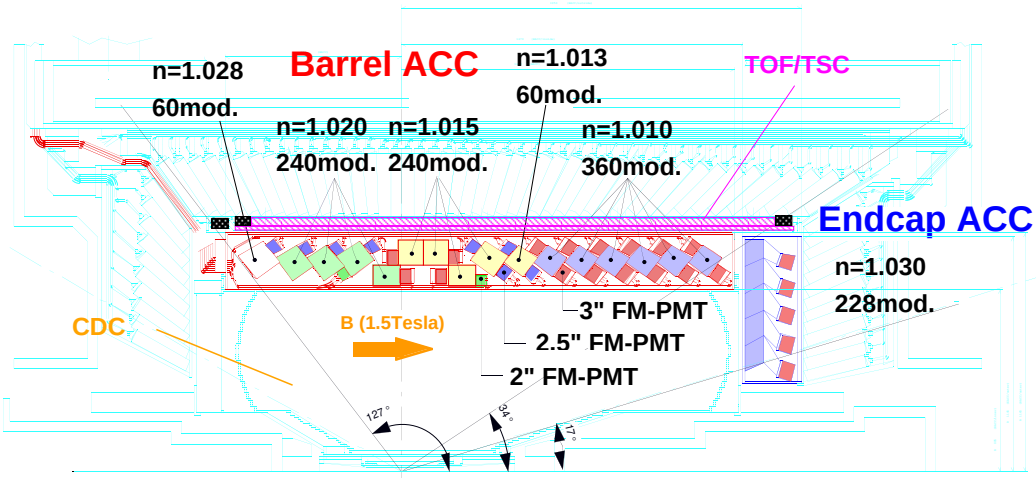

図 3.8: ACC の構造

向に 60 セルにわけられた 960 個のカウンターモジュールがあり、エンドキャップ部分は同心の 5 層に配列された 228 個のカウンターモジュールがある。すべてのカウンターは衝突点の方向を向いた状態で配列されている。

$\pi^{\pm}$ と $K^{\pm}$ をより良く識別するために、エアロジェルの屈折率は、$1.01 \sim 1.03$ の間を選ぶ。カバーしている領域は $17^{\circ} < \theta < 127.2^{\circ}$ である。ACC カウンターモジュールを、図

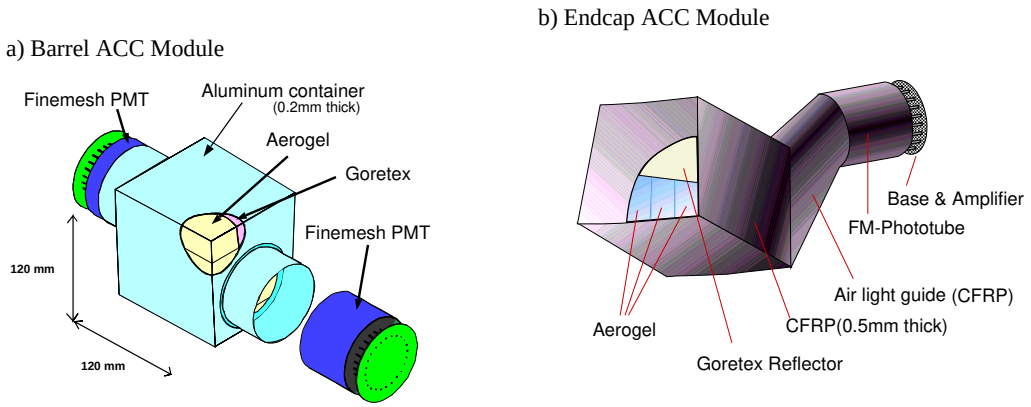

図 3.9: ACC カウンターモジュールの構造

3.9 の (a)(b) に示す。各々バレル部分とエンドキャップ部分に使われている。5 枚のエアロジェルのタイルが厚さ 0.2mm のうすいアルミニウム製の一辺 12cm の立方体の箱の中に積み重ねられている。チェレンコフ光を検出するために、1,2 個の光電子増倍管 (ファインメッシュ型,FM-PMT) が取りつけられている。

3.2.4 飛行時間測定器 (TOF;Time of Flight)

飛行時間測定器 (TOF) は, プラスチックシンチレーションカウンターを使用した検出器で、荷電粒子の飛行時間を使って、粒子識別を行うための検出器である。本検出器は時間の測定精度が 100psec を達成しており、これによって運動量 1.2GeV を持つ粒子まで識別が可能である。これは、$\Upsilon(4s)$ で生成された粒子の 90%に相当する。
100ps の時間精度を実現するために、シンチレーション発光の立ち上がりの速いシンチレーターを使用した。カウンター内を伝達するシンチレーション光の時間的分散を最小にするために light-guides は使用されていない。また光子収集を最大にするために、感度が広域のフォトカソードを持つ光電子増倍管を使用している。TOF システムは 128 個の TOF カウンターと 64 個の TSC カウンターから成る。台形の形をした長さ 1.2m の TOF カウンター 2 個と、TSC カウンター 1 個でモジュール 1 個を作り、衝突点から 1.2m(r=1.2m) の位置にある 64 個のモジュールで衝突点に対して、$34^\circ < \theta < 120^\circ$ の領域がカバーされている。

3.2.5 電磁カロリーメータ (ECL;Electromagnetic Calorimeter)

電子や光子は物質にあたると電磁シャワーを作り、エネルギーを失う。この全エネルギー損失を測定することで、電子や光子のエネルギーを非常に良い精度で測定するのが電磁カロリーメーター (ECL) の役割である。
Belle 実験において電子の識別は、CDC で測定された荷電粒子の運動量と ECL で測定されたエネルギーデポジットとの比 (E/P) により行うことができる。荷電粒子が電子の場合は、この比が 1 であるのに対し、荷電 π 中間子などのハドロンが ECL に入射した場合エネルギーの一部を失うため、E/P が 1 よりずっと小さくなる。これを利用し、電子とハドロン (π,K) との識別が可能である。

上記の要求を満すために、Belle では CsI(Tl) 結晶を電磁カロリーメータとして用いている。シンチレーション光の読み出しには、磁場中で問題なく使えるシリコンフォトダイオード 2 枚を用いている。1 個の CsI(Tl) カウンターのサイズは前面が $5.5cm \times 5.5cm$ で長さが 30cm である (図 3.10)。ECL はこの CsI カウンターが 8736 個使われている。その断面図を図 3.11 に示す。バレル部分は内径が 1.25m で長さ 3m である。前方と後方のエンドキャップは衝突点から Z 方向に+2.0m と-1.0m の位置にある。前方エンドキャップは

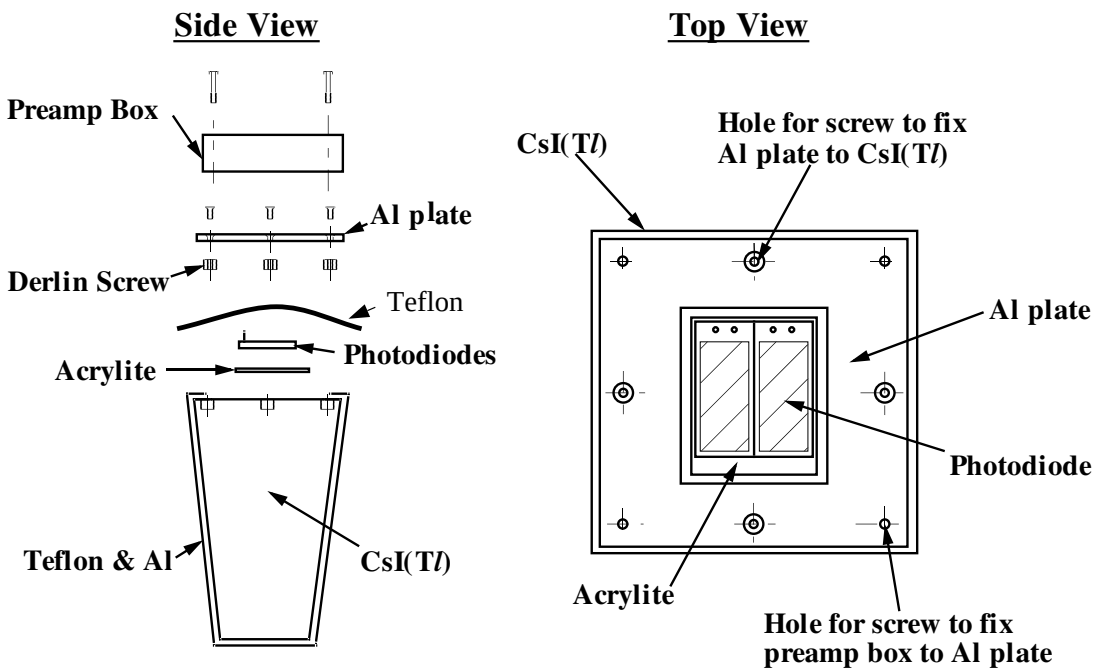

図 3.10: CsI(Tl) カウンター

$12.4° \sim 31.4°$、バレルは $32.2° \sim 128.7°$、後方エンドキャップは $130.7° \sim 157.1°$ の領域を各々カバーしている。

光子が ECL に入射した場合、その信号は 1 個の CsI カウンターに収まらず、周りの CsI カウンターまでおよぶ。直接光子が入射したカウンターは、周りのカウンターに比べ高いエネルギーを検出しているカウンターと定義し、そのカウンターを中心にカウンター 5 個 $\times$ 5 個(図 3.12) 領域内の 25 個のカウンターのエネルギーの和をそのシャワーのエネルギーとしている。達成されたエネルギー分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.066\%}{E} \oplus \frac{0.81\%}{E^{\frac{1}{4}}} \oplus 1.34\% \ , \qquad E \text{ の単位は } GeV$$

で与えられる。π^0 はほぼ 100%で $\pi^0 \to \gamma\gamma$ に崩壊する。特に高い運動量をもつ π^0 の検出は、2 つの γ のなす角度が小さいため、2 つの光子のシャワー領域が重なってしまう。そのため、1 つの光子としてエネルギーを測定してしまう。従って Belle 測定器では、高い運動量の π^0 から出た 2 光子の分離を CsI カウンターの表面を $5.5cm \times 5.5cm$ とシャワーの広がりより小さくすることで可能にしている。

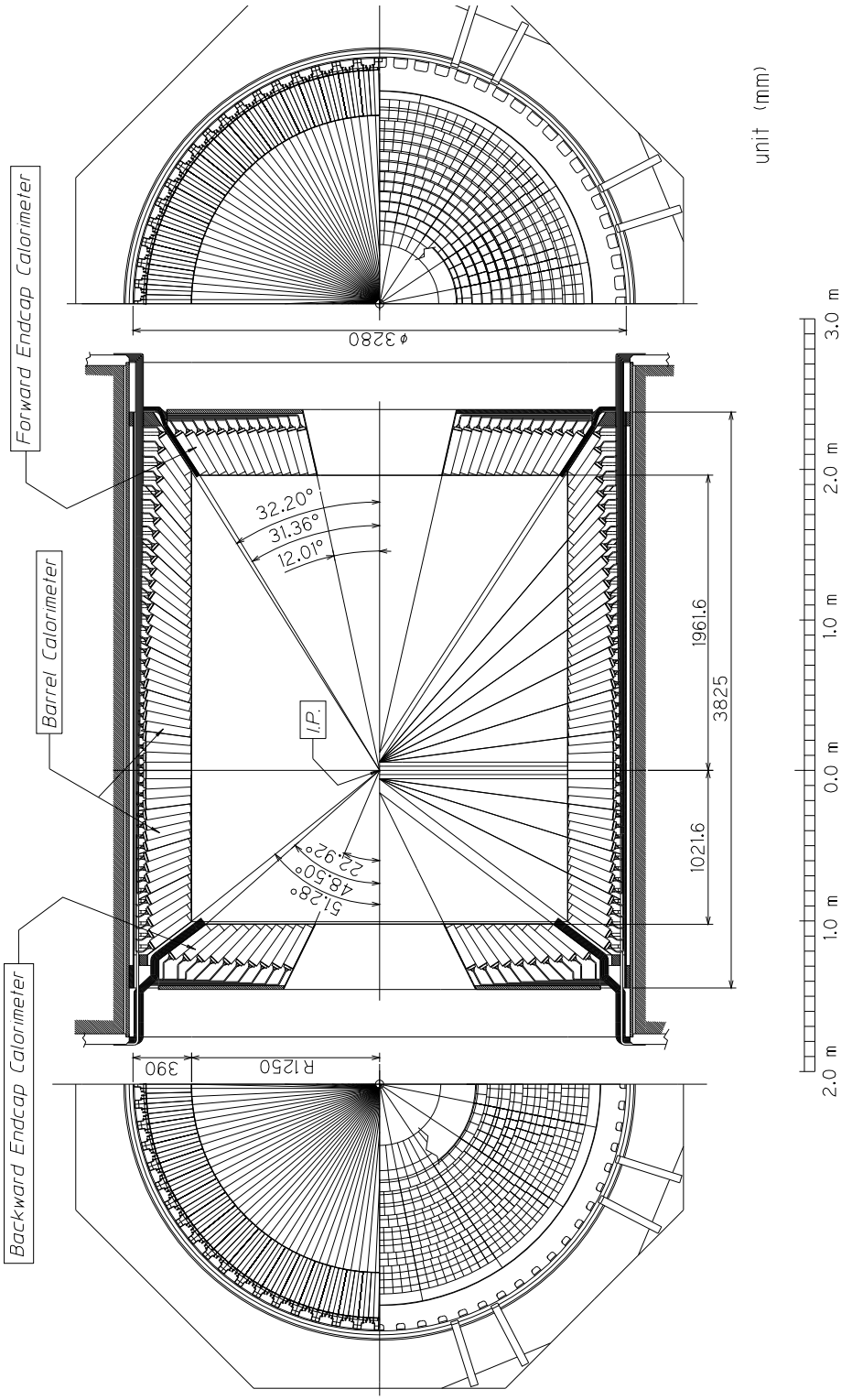

図 3.11: ECL の断面図

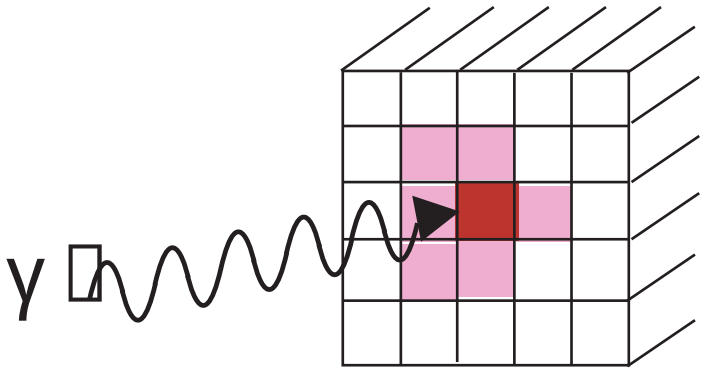

図 3.12: シャワーの再構成

3.2.6　K_L,μ 粒子検出器 (KLM)

Belle 測定器の最も外側に位置する K_L,μ 粒子検出器 (KLM) は 600MeV/c 以上の広い運動量領域での、K_L 及び μ 粒子の識別を役割としている。KLM 検出器は、高抵抗平行板チェンバーと厚さ 4.7cm の鉄を 11 層重ねた構造をもっている。

μ 粒子は貫通力が優れているため鉄を突き抜け、多くの RPC の層にクリーンな信号を残す。よって、CDC で測定した飛跡と KLM のヒットを関連づけることにより、μ 粒子の同定が可能である。一方で K_L は鉄と衝突し反応 (強い相互作用) を起こす。CDC に飛跡を残さず、KLM 内で残したシャワー信号は K_L によるものである。

3.2.7　Belleトリガーシステム

トリガーとは研究対象である物理事象を効率よく識別し、バックグラウンド事象を除き、収集すべき反応事象頻度を限られたデータ収集システム容量内に収めることを目的としている。目標としている $10^{34}_{cm^{-2}s^{-1}}$ のルミノシティーにおける各事象の断面積と Belle 実験で使用しているトリガーによるトリガー頻度を表 3.3 に示す。実際にはこの表にあげた物理事象の他にビームと真空パイプ中の残存ガスとの衝突点や宇宙線からのバックグラウンドが多くあり、それらを除いてこのような反応頻度におさえるのがトリガーの役割である。Belle トリガーシステムを図 3.13 に示す。各検出器にはサブトリガーシステムがあり、CDC は飛跡トリガー、ECL はエネルギートリガー、KLM は μ 粒子トリガーを各々行い、TOF がトリガーのタイミングを行う。これらの情報をまとめ、GDL(Global Decision Logic) が収集すべき事象と判断するとトリガーのゲート[3]が出される。

[3]最終的なトリガー。これをうけて、測定器のサブシステムごとに信号の数値化がスタートする。

物理事象過程	断面積 (nb)	反応頻度 (Hz)
$\Upsilon(4S) \to B\bar{B}$	1.15	11.5
Hadron production from continuum	2.8	28.
$\mu^+\mu^- + \tau^+\tau^-$	1.6	16.
Bhabha ($\theta_{lab} \geq 17^\circ$)	44.	4.4 $^{(a)}$
$\gamma\gamma$ ($\theta_{lab} \geq 17^\circ$)	2.4	0.24 $^{(a)}$
2γ processes ($\theta_{lab} \geq 17^\circ$, $p_t \geq 0.1$ GeV)	~ 15	~ 35
Total	~ 67	~ 96

表 3.3: $10^{34}_{cm^{-2}s^{-1}}$ のルミノシティーにおける各事象の断面積とトリガー頻度。Bhabha 散乱と光子対生成の事象は反応断面積が大きいので、トリガー頻度は 1/100 倍している

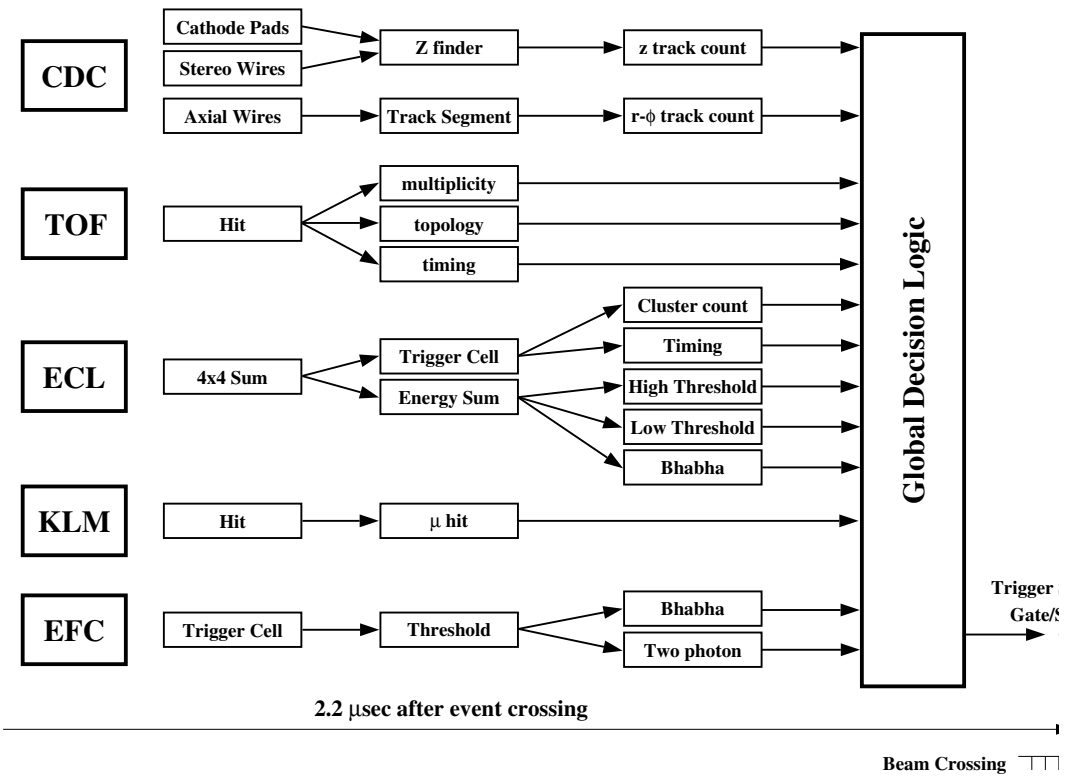

図 3.13: Belle トリガーシステム

3.2.8 データ収集システム (DAQ)

Belle 実験のデータ収集システムを図 3.14 に示す。各検出器のデジタル信号はイベントビルダーに送られ、位置事象分のデータにまとめられる。その後、オンラインコンピューターファームで事象生成が行われる。ここで、バックグラウンド事象を減らしてから、オフラインコンピューターシステムに転送られ、蓄積される。

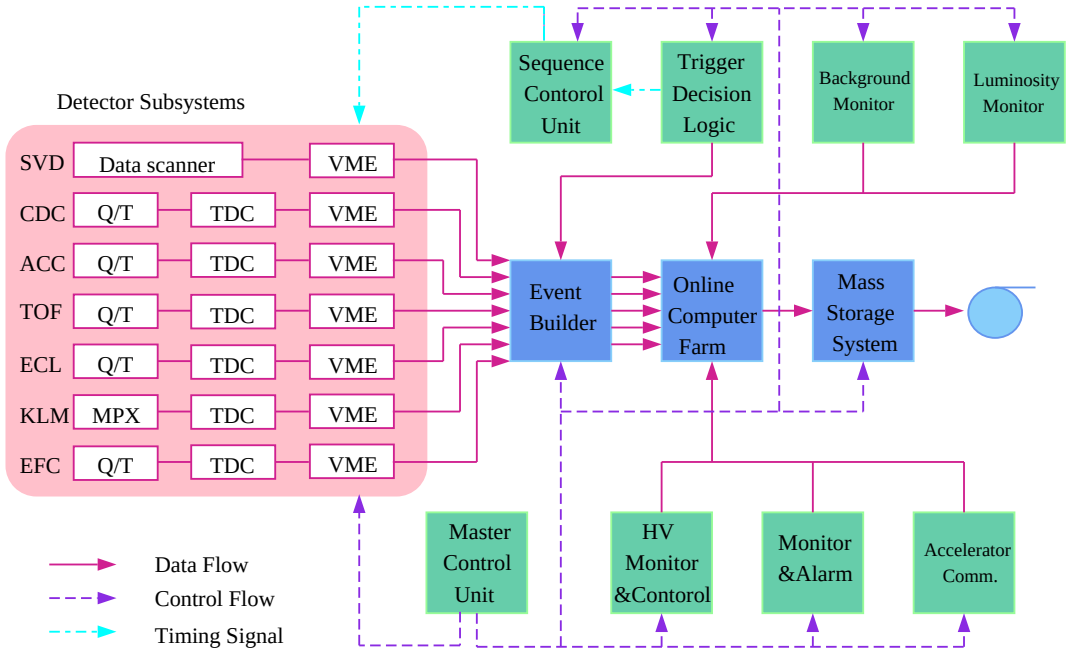

図 3.14: DAQ システム。データ収集システム。