

Belle II 電磁カロリメーター (ECL)

奈良女子大学 研究院・自然科学系・物理学領域

宮林 謙吉

miyabaya@cc.nara-wu.ac.jp

2014 年 (平成 26 年) 8 月 26 日

1 はじめに

Υ 領域の高ルミノシティ e^+e^- 衝突実験である Belle II 実験では, γ , π^0 , η といった中性粒子の検出がこれまでの Belle 実験同様に不可欠なのはもちろんである。また, ボトム・チャームの物理における LHCb 実験に対する競争力という観点では, ハドロンコライダーでは困難な $B^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau$ の崩壊分岐比や $B \rightarrow K^{(*)}\nu\bar{\nu}$ の探索のように, 消失エネルギーを制限することにより信号を見出すことが基本原理になっている測定の成否を電磁カロリメーターの特性が左右する。そこで本稿では Belle II 実験の電磁カロリメーター (Electromagnetic Calorimeter, ECL) について記す。

2 素粒子実験の電磁カロリメーター

電磁カロリメーターは, 重い物質に数十 MeV 以上のエネルギーを持つ γ や e^\pm が入射すると, γ からの e^+e^- 対生成と e^+ または e^- からの制動放射により, 多数の e^+ , e^- , γ の集団=電磁シャワーが形成されることを用いて, γ や e^\pm のエネルギー測定を行う。鉛やタングステンのように高密度の部材と, プラスチックシンチレーター, プロポーショナルカウンター, シリコン半導体検出器などの有感部を交互に配置し, 前者により発達した電磁シャワー中の粒子が後者の中で起こすエネルギー損失を読み出すサンプリング型と, 十分な密度の素材を選択して検出器全体を有感部とし, シャワーのアクティビティ全体を出力信号の形成に生かす全吸収型に大別される。

サンプリング型のカロリメーターは, 一般に全吸収型より安価に製作でき, $20\%/\sqrt{E}$ (E in GeV) 程度のエネルギー分解能を持つものが TRISTAN 加速器や LEP 加速器での実験でも建設・使用されてきた。また, 読み出しを細分化したい (高いグラニュラリティを持たせる) 意

表 1: 主な無機結晶シンチレーターと大型実験での実用例。L.O. (発光量) は NaI(Tl) を 100 とした相対値で, 記号 f と s は発光時間が短い成分 (fast component) と長い成分 (slow component) を示す。主な実験名 (Exp.) の下にカッコつきで示したのは選択された光検出器の略号で, PD=フォトダイオード, PM=光電子増倍管, APD=アバランシェフォトダイオードである。

	BGO	純 CsI	CsI(Tl)	PWO
ρ [g/cm ³]	7.13	4.51	4.51	8.3
X_0 [cm]	1.12	1.86	1.86	0.89
R_M [cm]	2.23	3.57	3.57	2.00
λ_{\max} [nm]	480	310 ^f 420 ^s	560	420 ^f 425 ^s
τ_{decay} [ns]	300	6 ^f 35 ^s	1300	10 ^f 30 ^s
L.O.	21	1.1 ^f 3.6 ^s	165	0.29 ^f 0.083 ^s
Exp.	L3 (PD)	KTeV (PM)	Belle (PD)	CMS (APD)

図がある場合も有感部を細かく分割した設計が可能なサンプリング型を用いる。その典型的な例が particle flow algorithm を活用してハドロンジェットのエネルギーを再構成する精度の確保を図るリニアコライダー実験での電磁カロリメーターである。この, エネルギー分解能よりもグラニュラリティを重視した設計思想に基づくカロリメーターの既存の例としては, LEP 加速器における ALEPH 実験 [1] のものが挙げられる。

一方, 1 GeV 以下のエネルギー領域でも数%以上のエネルギー分解能を達成することが要求される場合には全吸収型のカロリメーターが必要になる。検出体として液体 Xe を採用した MEG 実験が特異な例で, それ以外の多

くの実験では、限られた体積の中でシャワーを形成するため高い密度の素材として、無機結晶シンチレーターを使用している。これまでの素粒子実験における全吸収型カロリメーターの例では、表1に示すように、BGO, 純CsI, CsI(Tl), PWO といった無機結晶シンチレーターが量産され実用に供されてきた。

1970年代終わりにSPEAR加速器で稼働を始めたCrystal Ball測定器は、NaI(Tl)を採用しチャーモニウム崩壊からくる γ のエネルギースペクトラム測定に特化した実験であったが、1980年代になるとシリコンPINフォトダイオード(PIN-PD)の安定供給が可能になり、光電子増倍管と異なって磁場中で変化しない特性を生かして、結晶シンチレーターとの組み合わせによる全吸収型カロリメーターを荷電粒子の運動量測定用ソレノイドの内側に設置して、前方不感物質の量を低減したセットアップが汎用のコライダー実験測定器でも可能になった。Belle実験の電磁カロリメーターもその系譜に連なるもので、1.5Tの磁場を発生する超伝導ソレノイドの内側に設置されている。図1にBelleの電磁カロリメーター全体のビーム軸を含む断面図(r - z 平面図)を示す。前方エンドキャップ部に1152本、バレル部6624本、後方エンドキャップ部に960本のCsI(Tl)結晶を使用している。なお、Belle

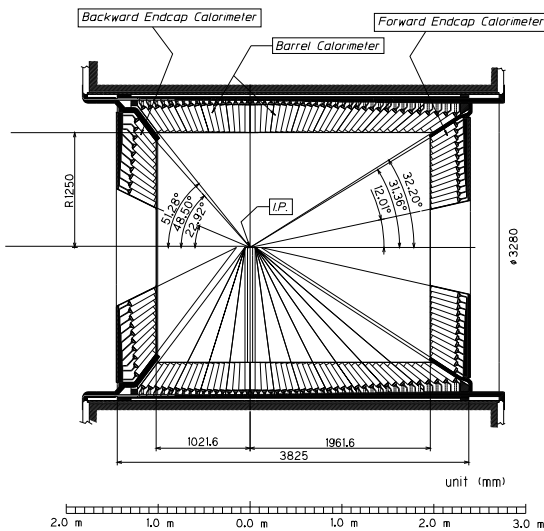


図1: Belle電磁カロリメーターのビーム軸を含む断面図(r - z 平面図)。バレル部内筒の半径は1250 mmで、荷電粒子の飛跡を検出するデバイスの有感領域 $17^\circ < \theta < 150^\circ$ の範囲に発生した粒子が形成した電磁シャワーのすそまで検出可能となるようエンドキャップ部のCsI(Tl)カウンターはその外側 $12^\circ < \theta < 157^\circ$ まで配置されている。

実験の電磁カロリメーターを建設するにあたって行われた種々の開発研究の内容については、池田仁美氏の博士

論文 [2] に多くの記述があり、この記事で触れきれない詳細に関してはそちらも参照されたい。

3 Belle実験の電磁カロリメーター

Belle/Belle IIのような、 Υ 領域の電子・陽電子コライダー実験での電磁カロリメーターへの要求として特徴的なのは、非常に広いダイナミックレンジである。 B 中間子の崩壊モードの1/3は $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ を含み、典型的な γ のエネルギーは数十 MeV から数百 MeV 程度であるが、 $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ のような二体崩壊の π^0 のエネルギーは4 GeVに達する。輻射崩壊から生じる γ のエネルギーも低いところから高いところまで重要な過程がいくつも関与しており、 $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma$ や $\Omega_c^0(2770) \rightarrow \Omega_c^0\gamma$ などバリオンの場合で数十 MeV 程度、 $\chi_{c1,c2} \rightarrow J/\psi\gamma$ のようなクォークoniumの場合は数百 MeV、 $B \rightarrow K^*\gamma$ に代表される B 中間子の輻射崩壊では4 GeVに達する。数十 MeV の γ を検出可能にするには、そのシャワーの一部を捕らえたシンチレーター結晶中における数 MeV 程度のエネルギー損失を雑音から十分に分離せねばならないので、1チャンネルあたりの雑音をエネルギーに換算した値(これをEquivalent Noise Energy, 以下、E.N.E.と記す)は数百 keV 程度に抑える必要がある。一方、電磁カロリメーターの較正はBhabha散乱や $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 事象で行い、KEKB加速器では θ に依存して最大8 GeV (SuperKEKB加速器ではビームエネルギーが変更され最大7 GeV)の e^- , e^+ または γ が入射する。結晶シンチレーターの発光量の個体差を考慮すると、光検出器および信号処理エレクトロニクスは最大10 GeVをレンジの上限と考えて設計すべき、ということになる。この広いダイナミックレンジをカバーしながら、Belle実験の電磁カロリメーターはハドロン事象中の約 $5 \text{ MeV}/c^2$ の $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 質量分解能と、 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 事象のエネルギー総和の分解能として1.7%を得た。以下にその設計を概観する。

全吸収型カロリメーターのエネルギー分解能は、1 GeV以上の領域では、電磁シャワー中の電子・陽電子・光子の一部が検出体の外へ逃げる「シャワーの漏れ」の統計的ふらつきが主な寄与になる。シャワーの漏れの量は、主として検出体の厚み=シンチレーター結晶の長さを放射長(radiation length, X_0)換算で表した量で決まる。Belleでは長さと同断面がそれぞれ30 cmと約 $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ (前面)のCsI(Tl)結晶を使用しており、結晶の軸が衝突点付近を向くポイントングジオメトリを実現するためにテーパ形状にしている。この長さは $16.1 X_0$ に対応する。LEP加速器におけるL3実験のBGOカロリメーター

[3], SPring-8 加速器の LEPS2 ビームラインに設置された BGO-egg カロリメーター, LHC 加速器における CMS 実験の PWO カロリメーター [4] など, 厚みを $20 X_0$ あるいはそれ以上とした実験が多いのと比べると若干短い, これまでに Belle 実験から多くの論文が出版されてきたことが示すように, B 中間子の研究に必要な性能を確保した上でのぎりぎりの妥協と言えよう。CsI(T_l) 結晶の幅 (約 5.5 cm) はモリエール半径 (R_M) の 1.5 倍強の値に対応し, γ が入射した結晶を中心に 5×5 本の領域をとれば, 側方へのシャワーの漏れが実用上問題にならないようにエネルギーを再構成することが可能である。

数百 MeV 以下の領域におけるエネルギー分解能は, 前述の E.N.E. に大きく左右され, ボトム・チャームハドロンの崩壊から発生する $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ を再構成する質量分解能に直接影響する。E.N.E. 低減には, シンチレーターの選択, 光検出器との相性, 読み出しエレクトロニクスの特性の三つの要素のバランスをとったソリューションを見出す必要がある。CsI(T_l) はエネルギー損失 MeV あたり約 5 万光子におよぶ豊富な発光量を誇り, 発光波長のピークエミッション λ_{\max} が 560 nm と PIN-PD との相性が非常によい特性を示す。実際, CLEO(-II, -III) に始まり, Belle と BaBar を含め, これまでに Υ 領域で実行された高輝度電子・陽電子衝突実験のすべてで CsI(T_l) の PIN-PD 読み出しが用いられてきた。唯一の弱点は, 発光の減衰時間 τ_{decay} が 1.3 μs と長いことからくるパイルアップで, Belle II のように $10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に近いミノシエティの環境では後述するように対策が必要になる。

光検出器は, 磁場中で動作し, 受光部面積が十分大きく, 組み合わせるシンチレーターの発光波長で高い量子効率を示し, かつ雑音を低減するためにデバイス容量が適正に小さいことが求められる。今日でこそ, 磁場中で動作し, 単一光子検出すら可能なハイブリッド APD (HPAD) や PPD (Pixel Photon Detector, 浜松ホトニクスの商品名は Multi Pixel Photon Counter: MPPC) などの半導体光検出器も入手可能であるが, LHC 加速器における CMS 実験の PWO カロリメーターを建設するために, $5 \times 5 \text{ mm}^2$ のリバース型 APD (浜松ホトニクス製 S8664 型) を量産する目処が立った時期が 1990 年代後半から 2000 年代初頭であることを顧みると, Belle の設計を固めた当時は, 磁場中で動作可能で, 受光部面積・量子効率とデバイス容量の三つのパラメーターが必要な水準に達し, 安定に供給されて, 現実的な予算の範囲内で調達可能なデバイスは事実上 PIN-PD に限られていたといえる。PIN-PD は増幅率=1 のデバイスなので, 定格の電圧を印可した状態では, 出力する信号の温度依存や印可電圧依存は非常に小さく, 長期にわたって安定に動作するし, 適した波

長の光に対しては半導体光検出器の利点である 80% 以上の高い量子効率を発揮する。ただし増幅率=1 であることと, 400 nm 未満の短波長の光に対しては量子効率が低い, E.N.E. を十分小さくするためには, 適した波長で豊富に発光するシンチレーターと組み合わせる必要がある。

Belle では浜松ホトニクス製の $1 \times 2 \text{ cm}^2$ の面積を持つ S2744-08 型の PIN-PD を, 一個の CsI(T_l) 結晶に二個取り付けている。二個の信号は独立に電荷積分型プリアンプで増幅した後, シェーパー初段でアナログ和をとることによりハードウェアの冗長性を確保している。この PIN-PD 一個あたりのデバイス容量は 80 pF で, 後述する読み出しエレクトロニクスとの組み合わせでは, PIN-PD 二個の和をとる CsI(T_l) カウンター一本あたり雑音レベルは電子数で約 1000 個, 一方シンチレーション光の読み出しにより約 5000 個/MeV の電子・正孔対を得るので, E.N.E. は約 200 keV となる。二つの PIN-PD は透明アクリル製のプレートに接着して一体としたものを, 結晶の読み出し面 (後面) にエポキシ樹脂系接着材 (ECOBOND24) を用いて接着している。これは, CsI 結晶はわずかに潮解性があるため直接 PIN-PD を接着しにくく, アクリル製プレートを介した方が安定に固定されるため, アクリルに若干の吸湿性があることによると考えられている。したがって, 接着工程を行う環境も乾燥している必要があり, PIN-PD のアクリルプレートへの接着は, KEK 富士実験室 B4 に湿度 15% 以下に保った作業室を設置して行った。

この二枚の PIN-PD に十分にシンチレーション光を集め, 結晶内でシンチレーション発光が起きた場所による読み出し光量の不均一度を抑えるため, CsI(T_l) 結晶は厚み 200 μm の白色テフロンシート (Goretex) で包む。さらにその上から厚み 25 μm のアルミニウム層と厚み 25 μm の PET 樹脂層を持つアルミナイズドマイラーでアルミニウム層が内側になるように包むことによって, 静電遮蔽するとともに測定器構造体側と絶縁して読み出しエレクトロニクス側で一点アースとする。PIN-PD の信号は, CsI 結晶に固定したアルミニウム製ケース内のプリアンプで増幅して外に取り出す。CsI カウンターの構造を図 2 に示す。

既述した通り, 全体で 8736 本の CsI(T_l) 結晶を使用し, 一本の質量が約 5 kg であるから結晶の総重量だけで約 44 トンである。これを設計位置に保持する機械的支持構造も実現は決して簡単なものではなかった。バレル部では薄肉アルミニウム合金の内筒と強固な SUS 製ブリッジ・補強棒・外板で作られた外側の構造を, ϕ 方向に 72 区画に分ける位置の薄肉アルミニウム合金製のフィンがたが, たとえていえば自転車の車輪の輪芯とリムの間をスポー

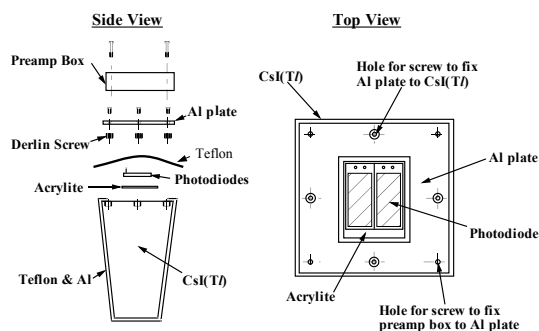


図 2: CsI(Tl) カウンターの構造図。結晶の読み出し面に二枚の PIN-PD を接着し、プリアンプをおさめたアルミケースをとりつけている。CsI 結晶はドリルとタップによる加工が可能で、デルリン製ヘリサートを通じてネジによりアルミケースを固定する。

クがつなぐような構成にしている。当初、このフィンと内筒の接合をレーザービーム溶接したものは CsI(Tl) カウンターを装填中に溶接部の破壊が進んでいたことが装填作業終了後に発見され、バレル部構造体の再製作を強いられたことは幅氏が執筆した高エネルギーニュースの記事 [5] にも言及されている通りである。全部の CsI(Tl) カウンター、ケーブル、冷却および乾燥空気の配管を取り出し、再製作したバレル部構造体では、内筒とフィンの接合をフィン先端部を直角に折り曲げてビス止めに変更した結果、事なきを得て今日に至っている。レーザービーム溶接では、溶け込み部の厚みが 0.3 mm 程度しかない（接合部がかさばらないことが売り文句であったのだから当然だが）こと、破断を防ぐには CsI(Tl) カウンターを積み込んだときの荷重に対し、広い範囲にわたって少しずつ変形して応力が分散することが必要だが、溶接では固着されるため接合部の一端に応力が集中しやすく、いったんどこかで破断が始まると、そのすぐ隣に応力集中が発生して破断が広がりやすいこと、の二点が互いに関連して大規模な破壊に至ったと理解されている。事前にレーザービーム溶接のテストピースを作成し、引張り試験機による破断荷重の測定も行われて、強度に余裕があるはずとの見積もりであったが、その時点では発注側の物理屋も受注側 (IHI) のエンジニアも、CsI 結晶の積み込み荷重による変形の影響について予見するのは困難であったと結論づけてよいだろう。エンドキャップ部も ϕ 方向に 16 分割する位置に薄肉アルミニウム合金製のフィンを持ち、前板との接合はレーザービーム溶接を用いたが、こちらはフィンと前板を接合するスパンが 1 m 以下で、フィンと内筒を接合するスパンが約 3 m におよぶバレル部よりも短く、大きな問題にはならなかった。

Belle 実験において、CsI(Tl) カウンターが発する信号を処理した読み出しエレクトロニクスブロックダイアグラムを、図 3 に示す。Belle で用いられた波形整形部

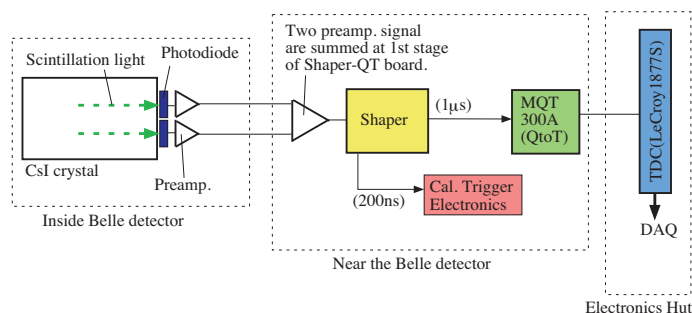


図 3: Belle 電磁カロリメーターの信号処理エレクトロニクスのブロック図。

(Shaper) は、時定数 $1 \mu\text{s}$ と 200 ns の出力を持ち、前者は CsI(Tl) ごとのエネルギー測定を行う一方で、後者はトリガー判断に用いる。エネルギー測定については、既述した広ダイナミックレンジをカバーするため、Belle では MQT300A 型 QtoT コンバーターに 100 ns 幅のゲートパルスを与えると、信号電荷を規格パルスのリーディングエッジとトレーリングエッジの時間差に変換して出力してくるので、これを FASTBUS 規格の 1877S 型 TDC で数値化した。MQT300A と 1877S の組み合わせでは、12 bit の精度を持つ三つのレンジを自動切替するオートレンジセレクション機能により 18 bit のダイナミックレンジという要求を満たした。この Belle で用いた読み出しスキームは、SuperKEKB 加速器による高ルミノシティがもたらす高レートに耐えられないのはもちろん、ビームバックグラウンドの増加に伴うパイルアップに弱く、Belle II では読み出しエレクトロニクスを一新する。

4 Belle II でのソリューション

SuperKEKB 加速器・Belle II 測定器の設計を進める上では、高ルミノシティの達成（とそれに必要なビーム電流の増加）に伴う高レートの物理事象データを取りこぼさなく記録することはもちろん、付随して増大するビームバックグラウンドへの対処が必要不可欠である。SuperKEKB 加速器におけるビームバックグラウンドの見積もりは、ビームの運動を加速器のシミュレーションコードである SAD で計算し、それを GEANT4 で実装した測定器とその周辺に配置した機器のジオメトリに渡して、各測定器コンポーネントにおけるエネルギー損失を計算する方法をとっている。

SuperKEKB 加速器の運転中に Belle II 測定器に飛来するビームバックグラウンドの起源としては、ビームガス、シンクロトロン放射光、タウチェック効果（バンチ内で粒子どうしが衝突してリングを周回可能な力学的口径から外れる）、Radiative Bhabha 散乱といったものがある。どんな e^+e^- 加速器でも、完成後に運転開始直後は、ビームと残留ガスの散乱が問題になるが、ビームチェンバー表面からのアウトガスが枯れるとともに減少する。シンクロトロン放射光とタウチェック効果は、マスク（コリメーター）の最適化により、最終的に測定器に入射するものをブロックする解が見出された。最後まで除去が困難なのは radiative Bhabha 散乱 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ 散乱) で、 γ の放出により e^+ または e^- の少なくとも一方はエネルギーが落ちているため、衝突点の後で通過する最終収束用電磁石の磁場で曲がりすぎてビームパイプ内壁に当たりシャワーを作る。これが測定器に降り注ぐので、ビームバックグラウンドの量が加速器のルミノシティでスケールするという状況に対峙することになる。したがって、いかにしてビームバックグラウンドに耐えて性能を確保するかが中心的な課題となる。

最新の見積もりでは、ルミノシティが SuperKEKB 加速器の設計値である $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のとき、CsI(Tl) 結晶の放射線被曝量は、前方エンドキャップのもっとも内側で 10 Gy/年、その他のエンドキャップ部で数 Gy/年、バレル部で 0.5 Gy/年程度と予想される。これを単純に CsI(Tl) 結晶のシンチレーション発光の減衰時間である $1 \mu\text{s}$ の間に生じる CsI(Tl) 結晶一本あたりのエネルギー損失に換算すると、エンドキャップ部で数 MeV、バレル部でも 1~2 MeV となる。Belle での読み出し方法をそのまま使用し続けると、バレル部でもパイルアップによる雑音がこの $1 \mu\text{s}$ 中のエネルギー損失と同程度になると予想され、これは PIN-PD と読み出しエレクトロニクスのみで決まる E.N.E. の 5 倍から 10 倍にあたり看過できない。

そこで、Belle II の CsI(Tl) カロリメーターでは、波形サンプリング読み出しを行い、波形フィットによって CsI(Tl) カウンターごとの検出エネルギーに加え信号パルスのタイミングを求めるデジタル信号処理を行うエレクトロニクスを導入する [6]。Belle での読み出しスキームと、Belle II での読み出しスキームの比較を図 4 に示す。今日では、2 MHz のサンプリング周波数で動作する 18 bit の ADC が入手可能であり、レンジ選択のメカニズムなしに、必要なダイナミックレンジをカバーできる。

Belle II での読み出しエレクトロニクスアップグレードの要である波形フィットは、Shaper, Digitizer に加えて FPGA を搭載した Shaper+DSP ボード上で行う。このボード上の Shaper 部時定数は、高レート対応のため Belle

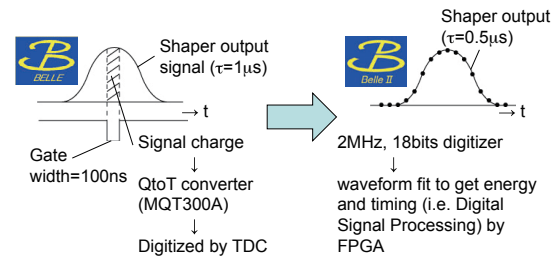


図 4: Belle と Belle II の電磁カロリメーターの読み出しスキームの比較。Belle では 100 ns 幅のゲートパルスを MQT300A 型 QtoT コンバーターに与え、その信号電荷 = 検出エネルギーを記録した。Belle II ではサンプリング周波数 2 MHz で 18 bit の Digitizer を用いて、波形フィットにより検出エネルギーに加えタイミングの情報を得る。

より短縮して 500 ns とした。波形フィットを MINUIT などを用いて数値的に差分を求めて行ったのでは時間がかりすぎて間に合わないので、Shaper が出力する信号の時間発展が解析的な関数で表現できることを用いて連立一次方程式を解く問題に焼き直して、足し算とかけ算の組み合わせで解く。そのための変数の値と論理を FPGA に与えて処理させるのである。この時定数 $0.5 \mu\text{s}$ の Shaper と 2 MHz の Digitizer を装備した Shaper+DSP ボードのプロトタイプは Belle 実験がデータ収集を終了する少し前に後方エンドキャップ部の一部 (1/8) に接続して 1 fb^{-1} のデータを収集して試験した。その結果、検出エネルギーが 100 MeV 以上のとき時間分解能は 10 ns で、Belle の環境ではパイルアップ雑音を 2/3 から 1/2 と小さくできることを示した。また、CsI(Tl) カウンター出力信号パルスのタイミング情報も得られるので、トリガーとタイミングが一致しない CsI(Tl) カウンターのヒットをとりぞく。これにより、ビームバックグラウンドに起因して物理事象中に残ってくるシャワーの数を 1/7 に減らすことが可能となる見込みである。

Belle II 実験の本番用 Shaper+DSP ボードは VME 3U 規格のフォームファクターで作成し、一枚のボードに 16 チャンネルを接続する。一枚のボードに接続された 16 本の CsI(Tl) カウンターが 4×4 のマトリクスを形成するように接続し、この 16 本のカウンターの時定数 200 ns で波形整形した出力の和をトリガー論理を形成する最小単位とする。Shaper+DSP ボード上の FPGA は、波形フィットに加えて処理済みの 16 チャンネルの信号を多重化して Collector モジュールに送る。Collector モジュールは VME クレートに一枚挿入され、当該 VME クレート中の 12 枚の Shaper+DSP ボードのデータを取りまとめて、後段の COPPER へ送る。全部で 52 台の VME クレートを

Belle 測定器構造体の周辺に配置し、VME クレートごとに Collector モジュールが送り出したデータはエレクトロニクスハット（測定器の脇にある読み出しエレクトロニクスを設置するための実験ホール内建屋）内の COPPER で受け、それを中央データ収集システムの初段にあたるイベントビルダーに送る。この一連の読み出しエレクトロニクスのブロックダイアグラムを図5に示す。これまで

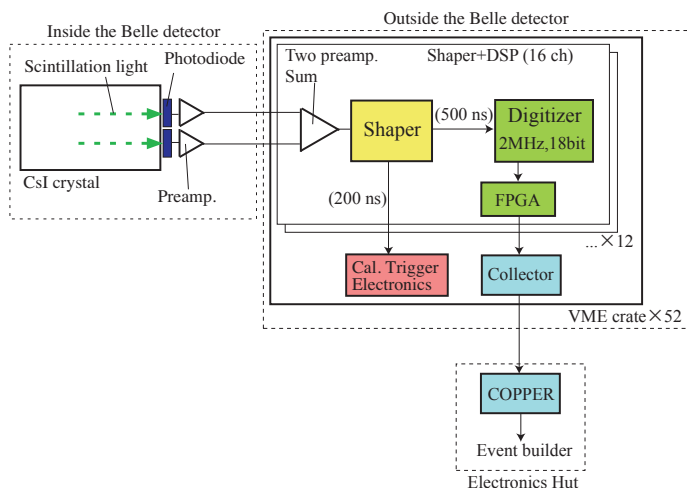


図 5: Belle II 電磁カロリメーターの信号処理エレクトロニクスのブロック図。

に、バレル部向け Shaper+DSP ボードの量産は終わり、納品後の試験も済ませて、この原稿を書いている時点では、順次 Belle 測定器構造体まわりに配置した VME クレートに挿入し、CsI(Tl) カウンターに接続して宇宙線テストを準備している。この CsI(Tl) 読み出しエレクトロニクスの更新は日本 (KEK, 奈良女大), ロシア (BINP), 韓国 (漢陽大) のメンバーで進めている。

5 純 CsI によるアップグレード

Belle II 実験では、既述したように Belle 実験の電磁カロリメーターを構成する既存の CsI(Tl) 結晶のシンチレーション光を PIN-PD で読み出すカウンターを用い、読み出しエレクトロニクスの改良によって高計数率環境に対処するが、特にビームバックグラウンドのレベルが高い前方エンドキャップの結晶シンチレーターを発光時間が短い純 CsI に置き換えるオプションも検討している。

CsI よりも密度が高い、すなわち X_0 と R_M が短かければ、 $20 X_0$ の長さを確保して、結晶を置換した部分に入射した粒子に対しては、1 GeV 以上の高エネルギー領域でのエネルギー分解能を改善できる。そこで純 CsI 以外の結晶シンチレーターも検討したが、GSO, LSO, LYSO

など、高密度で数十 ns 程度の短い発光時間を持ち大光量と三拍子そろった高性能のシンチレーターは、どれも融点が 2000°C 前後で、結晶を育成するには原料を投入・熔融するのにイリジウム製のつぼが必要になる、結晶育成を酸素がある雰囲気で行う必要が生じる場合もあり、その際は、つぼの消耗も激しいなど、高コスト要因が多い。それゆえ Belle II 実験のエンドキャップ部に用いる量を現実的な額の予算で調達することは困難な状況である。BGO は発光時間が 300 ns と CsI(Tl) の 1/4 程度なのでパイルアップ雑音の除去効果が限定的であろうと考えられる一方、BGO のゲルマニウムを硅素に置換した BSO 結晶は発光時間が 100 ns とじゅうぶん短いもの、シンチレーターとして機能しない茶色で不透明な異なる相が出現しやすいので長さ 20 cm に達する大型の結晶インゴットを育成する歩留まりの改善が難しいことが判明した。こうした理由から、エンドキャップ部を置換する結晶シンチレーターとしては、純 CsI が現実的に可能な解だという結論に至っている。

純 CsI は、表 1 に既述したように、CsI(Tl) と比較して、速い発光成分の波長が 310 nm と短く、シンチレーション発光量が数十分の一と少ないので、PIN-PD では E.N.E. を必要な水準まで小さくすることはまったく不可能である。したがって、適当な増幅率を持つ光検出器と組み合わせることにより E.N.E. を下げるソリューションを選択せねばならない。Photopentode は光電陰極と陽極の間に三段のファインメッシュ型ダイノードを配して合計 5 極とした電子管で、口径を 2 インチとすれば光電子数の統計は問題にならず、1.5T の磁場中でも磁場なしの場合の 1/3 程度の増幅率を発揮する。純 CsI 結晶にとりつけた試作カウンターを時定数 30 ns と非常に速い波形形成回路で読み出しても E.N.E. は既存 CsI(Tl) カウンターと同程度であることを示したため、光検出器のベースラインと考えている。一方、コンパクトで一つの CsI 結晶に複数個を取り付けてハードウェアの冗長性を確保できるメリットを考慮して、増幅機能を持つ半導体光検出器である浜松 S8664 型をはじめとした APD も検討と試験を行っている。400~500 nm では 80% 以上の高い量子効率を発揮するものの 310 nm の波長領域では 25% 程度に下がってしまう、受光部面積が 1 cm^2 の場合でデバイス容量が 270 pF と大きいなど、原理的な難点がいくつか存在している。したがって 100 倍から 150 倍程度と既存のアプリケーション例で一般的な 50 倍程度よりも高い増幅率で用いる、短い時定数の波形形成でも信号電荷収集効率が高いプリアンプを使用する、一つの純 CsI 結晶に 4 つの APD を取り付けて使うなどの工夫をすべて講じても Photopentode オプションと同程度まで E.N.E. を下げる

のは容易でない，ということがこれまでに得られた知見である。なお，Belle の CsI(T_l) では T_l のドープ量は数百 ppm から 1000 ppm 程度であるから結晶内のシャワーの発達は純 CsI と変わらず，したがって純 CsI にする場合も既存の CsI(T_l) カウンターと同じ形状に仕上げれば 1 GeV 以上の高エネルギー領域では今までと同じ性能を期待できる。

前方エンドキャップに純 CsI を導入するアップグレードには，昨年から Belle II に加わったカナダとイタリアのグループも興味を示し，純 CsI カウンターを量産する予算はいまだ確定していないが，Photopentode や APD の性能評価や長期安定性の試験，プリアンプ，機械支持構造の検討，消失エネルギーの制限が必要な崩壊モードにおける改善の見積もり，コミッショニング時におけるバックグラウンド量のモニターの検討などを進めている状況である。

6 まとめ

本稿では，Belle II 実験の電磁カロリメーターについて述べた。陽子ビーム衝突を前方で待ち構え，単位積分ルミノシティ当たりに検出される b ハドロンの数が， $\Upsilon(4S)$ での電子・陽電子コライダーに比して約 2000 倍に達する LHCb 実験との競争においては， γ ， π^0 ， η といった中性粒子の検出とともに，消失エネルギーの制限が必要な B 中間子の崩壊モードの信号抽出を可能とする性能の確保が至上命題である。CsI(T_l) 結晶シンチレーターを PIN フォトダイオードで読み出す 8736 本のカウンターに，2MHz のサンプリング周波数と 18bit のダイナミックレンジを持つ波形サンプリング読み出しエレクトロニクスを組み合わせるソリューションを採用し，この原稿の執筆時点では，宇宙線による総合試験を目指し，量産したバレル部用エレクトロニクスモジュールの試験，実機への組み込みと接続などの作業を進めている。エンドキャップ部への純 CsI の導入は，関連コンポーネントの R&D と物理へのインパクトおよびコミッショニング時のバックグラウンド量のモニターの検討などが進行中である。

参考文献

- [1] D. Decamp *et al.* (ALEPH collaboration), Nucl. Instrum. Meth. **A294** (1990) 121-178, Erratum-ibid. **A303** (1991) 393.
- [2] “Development of the CsI(Tl) Calorimeter for the Measurement of CP Violation at KEK B-Factory”;
- Hitomi Ikeda, Ph.D Dissertation, Nara Women’s University (Jan. 1999);
<http://www.hepl.phys.nara-wu.ac.jp/thesis/doctor/hitomi/main/>
- [3] Richard L. Summer for the L3 collaboration, Nucl. Instrum. Meth. **A265** (1988) 252-257.
- [4] Serguei Chatrchyan *et al.* (CMS collaboration), JINST **8** (2013) P09009 and cited articles.
- [5] “Belle 測定器：20 世紀最後のコライダー検出器”，幅淳二，高エネルギーニュース Vol. 30, No. 3, 170 (2011).
- [6] Edited by Z. Drezal and S. Uno, *Belle II Technical Design Report*, KEK Report **2010-1**, arXiv:1011.0352.