

Belle II KLM

KEK 素粒子原子核研究所

住澤 一高

kazutaka.sumisawa@kek.jp

2014年(平成26年)5月19日

1 はじめに

ルミノシティの増強に伴い、BelleのKLM検出器の内、エンドキャップ部全部とバレル部の一部をプラスチックシンチレータ型の検出器に交換することになり、平成25年秋にバレル部、26年春にはエンドキャップ部のうちフォワード側がインストールされた。バックワード側の製作も5月から行われ、順調に行くと7月にはすべての検出器がそろうことになる。タイミングとしてはちょっと早い気もするが、一段落したということで、現状をまとめたいと思う。

2 KLM 検出器

KLM 検出器は、 μ 粒子の同定と K_L^0 の検出のための検出器で、Belle 検出器の最外層に位置している。Belle 構造体は、八角柱を横倒しにした形状で、鉄製でソレノイドの磁場が外部に漏れないようになっている。これはシンプルな鉄のかたまりというわけではなく、約4.7センチメートルの鉄板を十数枚重ねた構造になっていて、約4.4センチメートルの隙間が各々の板の間に存在している。この隙間に、荷電粒子の通過を検出できるような検出器を置いておくと、ここを通過する荷電粒子の軌跡を再構築できる。この十数層の鉄と検出器とのサンドイッチ構造のものを KLM 検出器と呼んでいる。構造体はバレル部とエンドヨーク部からなっており、中央にあるバレル部を前後2つのエンドヨーク部で蓋をして内側を完全に囲い、磁場が漏れないようになっている。バレル部、エンドヨーク部それぞれに KLM 検出器を設置しており、それぞれバレル KLM、エンドキャップ KLM と呼んでいる。Belle II 検出器、KLM 検出器の位置を図1に示す。

Belle 構造体と一体になった検出器ということは、KLM 検出器の内側には別の検出器が配置されていることになる。この内側の検出器で、既に荷電粒子の運動量、光子や電子のエネルギーなどは測定されている。その後、

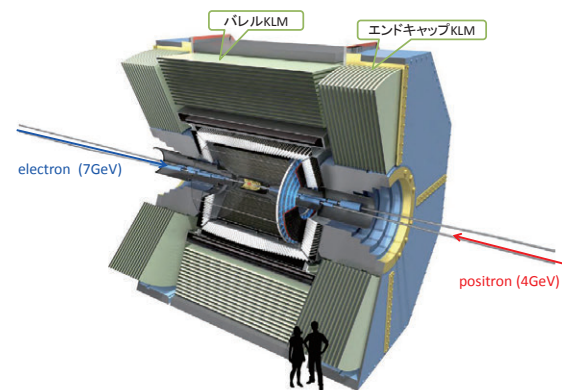


図 1: Belle II 検出器。KLM 検出器は構造体の隙間に配置されている。

KLM 検出器まで粒子が来るのだが、この時 μ 粒子と荷電ハドロンでは違いが出てくる。 μ 粒子は物質中で電磁相互作用により電離損失をするのみであるため散乱がさほど大きくならないが、荷電ハドロンは強い相互作用もするので、多重散乱が大きくなる。この差を利用して、内部の検出器で測定された軌跡と KLM 検出器での軌跡とのマッチングから、荷電粒子が μ 粒子かどうかの同定が行われる。KLM 検出器まで来る粒子としては、中性 K 中間子のうち長寿命の方 K_L^0 もある。 K_L^0 自体は特に検出器内で反応しないので、その通過を捕らえられないのだが、鉄内で核子との相互作用で発生する荷電粒子は検出が可能である。よって、鉄内でシャワーを起こした K_L^0 は検出できることになる。これらが、KLM 検出器の基本的な役割になる。

設置される検出器としては、通過した場所(設置した場所は既に知っているのもので、残りの2次元)と通過時間が分かればよい。要求される性能としては、1センチメートル程度の位置分解能と数ナノ秒の時間分解能で、実はたいしたことはなく、どの検出装置を取ってきてもこの程度の性能は有している。問題は設置面積で、それ程

規模が大きくない Belle 検出器ですら、約 1800m^2 分を用意しないといけない。そこで、比較的安価で大量に作れそうなものが採用されることになる。Belle 実験では、Resistive Plate Counter(RPC) という検出器を採用した [1]。これはガスチェンバーの 1 種で、2 枚のガラスやベークライトなどの高抵抗の板を数 mm のギャップで並べた構造になっている。これを炭素膜など高抵抗の素材で出来た電極で挟み、そこに 1 万ボルト前後の電圧を印加しギャップに適切なガスで満たすと、荷電粒子が通過した場所にのみ放電が起こる。そこで、その信号を読むような電極(たとえば数 cm のストリップの金属膜を並べたもの)で挟めば、この電極に信号が誘起され、通過位置が電気信号に変換される。これは、高抵抗の板、炭素膜、適当な読み出し用の膜があればよいので、どんな面積でも作る事が可能である。また、それ程高価な素材を必要としない。大面積が必要となる実験装置では、結構採用されている。Belle 実験の場合は、高抵抗の板としてガラスを採用した¹。1999 年開始から 2010 年の実験終了まで壊れることなく、安定した性能を發揮していた。Belle II 実験でもそのまま使用できたら何の苦勞もないのだが、そうは問屋が卸さなかつたらしい。実は、問題は 2004 年ぐらいから起こっていた。KEKB 加速器が順調に性能を上げていき、このころにはルミノシティが当初予定の $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に到達していた。また、ビームを貯めながらデータを採ることが可能となり、一定のビーム強度で一定の衝突頻度を保てるようになった [2]。この時期から、エンドキャップ部の KLM の検出効率が悪化していったのである²。原因は検出器近傍にある加速器の機器から発生する中性子に因るものであることが判明した。RPC という検出器は、Belle 実験で使っている動作³だと、ある領域が 1 回の放電現象から通常の検出可能状態に復帰するのに数秒必要となる。この間は、その領域には電圧がかかっていない状態になるので、粒子が通過しても信号は誘起されない。我々の検出器だと、数 Hz/cm^2 程度のレート耐性だと考えている。つまり、バックグラウンド起因の粒子による放電現象が多発すると、KLM 検出器は不感になる時間が多くなり、欲しい信号はほとんど得られなくなる。これが、エンドキャップ部の外層部 4 層程度とバレル部の内層部 2 層程度に見られた。Belle 実験でさえこうなので、Belle II 実験では目も当てられないことになりかねない。実際、Belle 実験でのデータから外挿すると、Belle II 実験では、エンドキャップ部は完全に不感、バレル部は最内層で 70% 近く不感になってしまうという悲惨な予想となった。そこで、エンドキャップ部すべてとバレル部内側 2 層を交換することになった。使用する検出器はレー

ト耐性がそれなりに高いことが追加要求される。そこで、Belle II 実験ではプラスチックシンチレータを採用した。プラスチックシンチレータに溝もしくは穴を掘り、そこに波長変換ファイバー (WLS ファイバー) を差し込む。その先に、適当な光検出器を付けて 1 セットとし、これらを並べて大面積に対応できるようにする。また、もう一枚を直行する方向に重ねることで、2 次元情報が得られるというわけである。プラスチックシンチレータは、バレル部とエンドキャップ部で違うものが採用されているが、WLS ファイバーと光検出器はそれぞれ同じものが採用されており、WLS ファイバーはクラレ社、光検出器は浜松フォトリニクス社の MPPC を使用している。そして、信号を 10 倍程度増幅するプリアンプが光検出器に接続され、これらを一体化したものが構造体にインストールされる。ここで、シンチレータを並べ、MPPC、プリアンプを付けフレームに設置し、インストールできる形にした検出器をモジュールと呼ぶことにする。

3 バレル KLM

バレル KLM は、8 角柱上の構造物に差し込む形で設置される検出器で、15 層構造になっている。また、構造体を貫く検出器はさすがに長いので、フォワードとバックワードに分かれており、大きさは長さ 220cm、厚み 3.4cm、幅は層によって変わっていて 167 ~ 275cm になる (図 2)。Belle 検出器の建設当時は、この検出器が最初にインストールされた検出器だったので、フォワードのモジュールはフォワード側、バックワードのものはバックワード側からインストールが行われた。この領域は、加速器の構造物とは十分離れており、また加速器装置群からするとバレル KLM はエンドヨークの影に隠れている状態なので、外部からの来る中性子からのバックグラウンドはほとんど気にしなくてよいレベルになっている。問題になるのは、内側から来るいろいろな粒子からのバックグラウンドになる。そこで、15 層のうち、内側 2 層を、RPC からプラスチックシンチレータに交換することになった。バレル部については、アメリカグループが中心となって進めていて、この新しい検出器の製作も彼らが行った。

3.1 製作と輸送

最内層、第 2 層はプラスチックシンチレータに取り替えることになって、その製作はバージニア工科大学で行われた。モジュールの幅は、最内層は 154cm、第 2 層は 171cm で、長さ、厚みは一部を除いて同じである。プラスチックシンチレータは、FNAL 製を使用している (図 3)。厚みは 1cm、幅は 4cm になり、これらを Z 方向、 ϕ

¹実は珍しい。ベークライトを使っている実験の方が多い。

²具体的には、最大で 10% 前後悪化した。

³ストリーマーモードという。

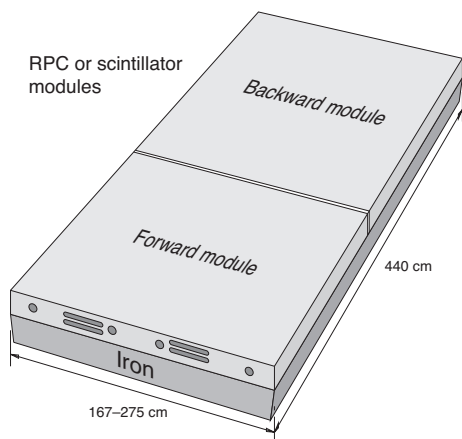


図 2: バレル KLM 検出器の概略図。

方向に並べたものが 1 セットになって荷電粒子の通過位置の 2 次元情報が得られることになる。並べる本数としては、Z 方向は 54 本、 ϕ 方向は最内層が 38 本、第 2 層が 42 本である。図 4 が、第 2 層用のモジュールの組み立て時の写真である。必要な枚数は、最内層、第 2 層それぞれ 16 枚で、バックアップ 4 枚をいれて計 36 枚が製作された。製作は 2012 年から 2013 年夏にかけて行われ、2013 年 7 月末から 9 月にかけて、4 回に分けて船便で KEK に送られた。その際の梱包が不十分で、航海中に検出器固定用の板が外れて、検出器がずれ動くというアクシデントがあった。測定器の状態を心配したが、宇宙線を使った測定などから、検出器にダメージがないことが確認され、また新たに見つかった一部のプリアンプの不具合は、不良品の交換で解決した。

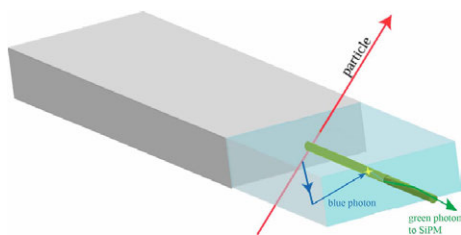


図 3: バレル KLM 用プラスチックシンチレータ。

3.2 インストール

KEK で行われたチェックの結果、モジュールに問題がないことが判明したので、次はインストールということになる。以前の Belle 検出器当時の治具が残っていたので、これを修理して使用可能な状態にした。しかし、いくつか以前の状態と違っていることがある。1 つめは、既に ECL 検出器 (CsI カロリメータ) が取り付けられており、これから出ているケーブルがフォワード側に張り巡らされている。フォワード側からモジュールを出し入れしようとする、一度このケーブルを巻き取る必要



図 4: バレル KLM モジュールの写真。これは第 2 層用である。

があり、結構大変な作業になる。次に、超伝導ソレノイドも設置されており、冷却用パイプなどがバックワード上部にある。そのためパイプが邪魔をして、モジュールをバックワード側に引くことが出来ない。これらの条件から、八角柱のうち、上部以外の 7 辺にある検出器は、すべてバックワード側から交換し、上部の 1 辺のみフォワード側から交換することになった。2013 年 7 月、ECL ケーブルのうち上部のケーブルのみを巻き取って、インストールの作業に影響が出ないところにまとめておいた。2013 年 8 月末からインストールを開始する予定だったが、輸送のトラブルと検出器のチェックにより時期が遅れて、実際には 10 月中旬から行われた。Belle 実験でのインストール作業のビデオや写真を見たりはしたのだが、テストもせずはぼぶっつけ本番といった感じだったので、まず既にある RPC のモジュールを抜く作業である程度の経験を得た後、新しいモジュールを入れる作業をした。最初の 2 週間ぐらいは結構苦労したが、ある程度慣れると、さすがに順調に作業が進み、11 月中旬にすべてのモジュールのインストールが終了した。図 5、6 は、インストールの様子と完成後の集合写真である。



図 5: バレル KLM モジュールのインストール。



図 6: バレル KLM モジュールのインストール完了時の集合写真。

4 エンドキャップ KLM

エンドキャップ KLM は、エンドヨーク部に取り付けである検出器になる。エンドヨークは、バレル部に蓋をするような 8 角柱状の構造体で、縦に 2 つに分かれており、開くことによってバレル部中央にアクセスできるようになる。このヨークの切り口から検出器を上部、下部へと差し込むことになる。バレル KLM は 15 層だったが、エンドキャップ KLM の場合は 14 層で 1 層少ない。モジュールの形状は、エンドヨークが 8 角柱なのでモジュールも 8 角柱を 4 つに切ったものかなと見せかけて、実は扇形である⁴。こちらは、バレル KLM のモジュールと違って、すべての層で同じ形状をしている。

4.1 製作と輸送、そして組み立て

エンドキャップ KLM の製作については、ロシアの ITEP グループが中心となって進めている。

モジュールの概略図を図 7 にしめす。モジュールが扇形なのでプラスチックシンチレータの形状も扇形、ということではなくてやはり細長い直方体で、得られる位置情報はバレル部と同じ XY 座標である⁵。プラスチックシンチレータはロシア製を使用している (図 8)。ストリップのサイズとしては、幅はバレル部とそれと同じく 4cm、厚みは 0.7cm、直方体を扇形に敷き詰めるので、長さは 60 ~ 280cm になる。座標ごとに 75 本のストリップ、1 モジュールあたり 150 チャンネル存在する。これを一旦 ITEP で仮組を行う。具体的な作業としては、シンチレータに溝を掘り、WLS ファイバーを設置、固定を行う。その後 15 本一組にして接着を行い、そこに中性子減速用のポリスチレンも接着する。そして、これらを 10 セット作って、1 モジュール分を段ボールに梱包する。これらの作業を行い、この段ボール箱と格子状のサポー

⁴角があるとインストールしにくそうだ。

⁵RPC の時の電極膜は $r\phi$ 座標だった。

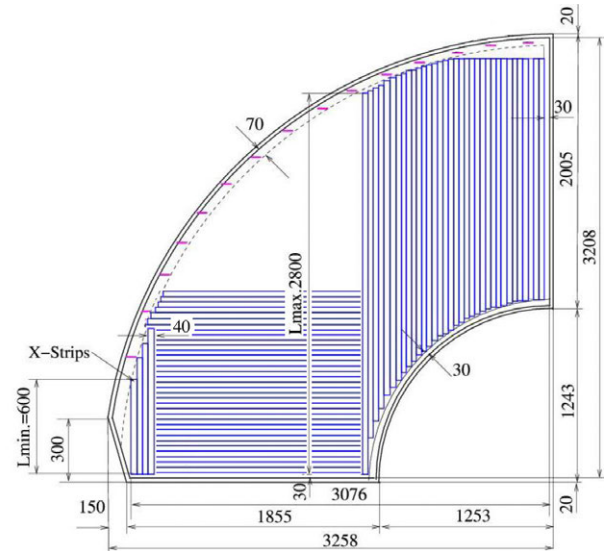


図 7: エンドキャップ KLM モジュールの概略図。

トフレームなどを集めてコンテナに詰め込み、KEK に送る。ここからの組み立ては KEK で行われる。サポートフレームに 15 枚にまとめられた検出器を差し込みシリコンシーラントで固定する。その後、MPPC を WLS ファイバーの終端に設置し、ケーブルで MPPC とプリアンプとをつなぎ、またプリアンプからケーブルを出して、フレームに蓋をして完成となる。図 9 が組み立て時の写真である。外枠のアルミニウムのフレームと蓋は Belle 実験で使用したものを流用している⁶。組み立てのペースとしては、1 日あたり最大 2 モジュールである。プリアンプの製造が予定より遅れたのだが、4 月の終わりまでにフォワード側のインストールに必要な 56 モジュールを組み上げることが出来た。

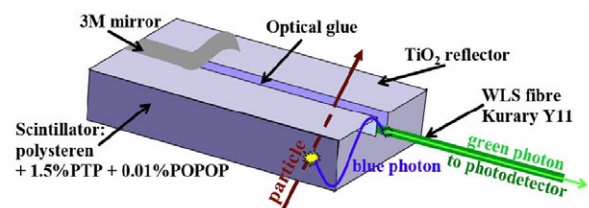


図 8: エンドキャップ KLM 用プラスチックシンチレータ。

4.2 インストール

フォワード側へのインストールは 2014 年 3 月から 5 月にかけて行われた。RPC のモジュールの取り出し自体は、2012 年冬と 2014 年冬に行われており、基本的にはこの作業を逆にすればインストールが出来るということで、比較的スムーズに行うことが出来た。インストール後のモジュールについてチェックを行い、正しく動い

⁶インストールの写真の違和感はこれに起因している。

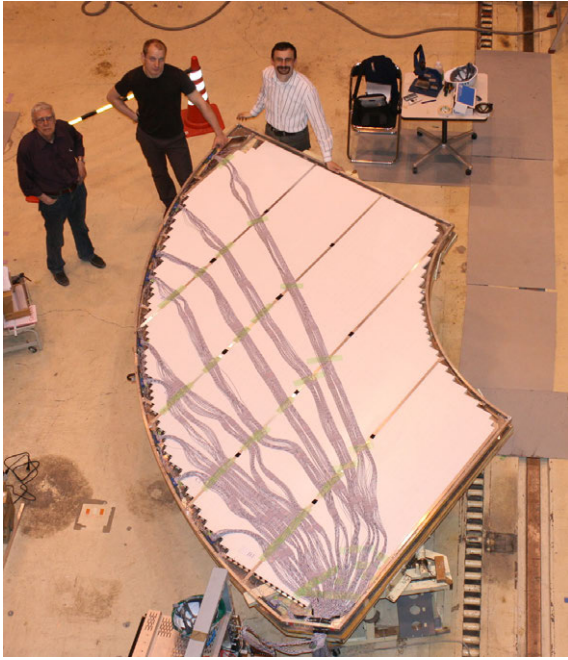


図 9: エンドキャップ KLM モジュールの組み立て。

ていることも確認済みである。図 10, 11 はその時の様子である。

5 これから

5月中旬から、バックワードのエンドキャップ KLM を製作している。こちらは、モンテカルロシミュレーションを使用した研究から、検出器のアクセプタンスの関係で 14 層も必要がないことが分かり、12 層となった⁷。順調に行くと 6 月末にはすべてのモジュールがそろい、7 月中にインストール完了となる。データの読み出しについては、RPC の読み出しも含めてすべての読み出しシ

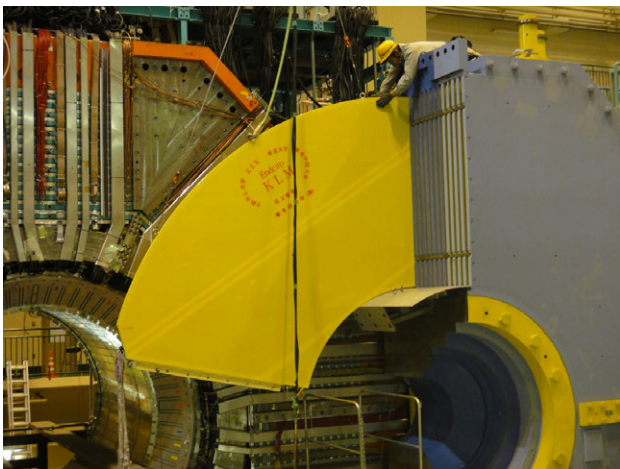


図 10: エンドキャップ KLM モジュールの上部へのインストール。

⁷外側 2 層分には、中性子シールド用にポリエチレンを入れる予定である。

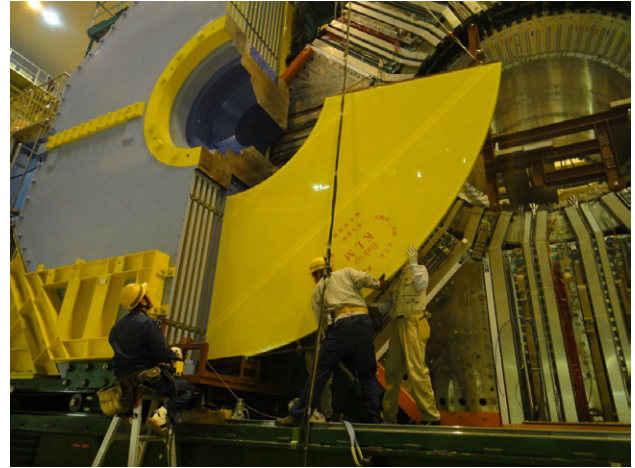


図 11: エンドキャップ KLM モジュールの下部へのインストール。

ステムを変更することになった。読み出し装置の製作はアメリカが中心になっており、RPC についてはインディアナ大学、シンチレータについてはハワイ大学が行っている。2014 年の 6 月にそれぞれのシステムを一つにしたテストをインディアナ大学で行うことになっており、この結果を踏まえて、夏にはバレル部の 1/8 か 1/16 を使用したテストを予定している。

6 おわりに

バックワード側のモジュールの組み立てとインストール、HV システムと読み出しシステムの構築などまだまだやるべきことはあるのだが、計画されたものが形となって構造体に取り付けられるのを見ると、それなりに感慨深い。影も形もなかった Belle II 検出器がこちらで製作されているのを見ると、Belle II 実験が始まるのだなど、気合いが入る。こんな環境は 10 年に 1 度、しかも世界を見渡してもそうはないので、実験が開始されて軌道にのるまでの 2, 3 年、楽しんで苦労したいと思っている。

参考文献

- [1] A. Abashian *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **449**, 112 (2000).
- [2] 船越義裕, 高エネルギーニュース **23-2**, 79 (2004).