

Belle II Aerogel RICH 検出器の建設と運転

KEK 素粒子原子核研究所

西田 昌平

shohei.nishida@kek.jp

2019 年 (令和元年) 8 月 20 日

1 はじめに

2019 年 3 月, Belle II 実験 [1] が本格的に開始した。Belle II は 2010 年までデータ収集を行った Belle の後継実験で, 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる SuperKEKB 加速器を用いて Belle の 50 倍となる 50 ab^{-1} のデータを蓄積する予定である。SuperKEKB は 2016 年には Belle II 検出器なしの Phase 1 運転を, 2018 年には崩壊点検出器以外の Belle II 検出器をインストールしての Phase 2 運転を行い, 今年から全ての検出器をインストールした物理ランである Phase 3 運転を開始した。Belle II 検出器は, これまでの Belle 検出器 [2] と外見はほぼ同じであるが, ルミノシティが 40 倍になることによる高レート, 高バックグラウンドに耐えられるように, また Belle 検出器よりも性能を向上させるため, 中に設置されている検出器は大幅にアップグレードされた。その一つ, 前方エンドキャップの粒子識別装置として新たに導入した Aerogel RICH 検出器 (以下 ARICH) [3] を紹介したい。この記事では, ARICH の各要素の研究開発などについては省略し, 建設とコミショニングを中心に述べる。

2 Aerogel RICH 検出器の概要

Belle II のようなフレーバー物理の実験では, 荷電粒子の粒子識別性能が鍵となる。特に K と π の識別は, フレーバータグや新物理探索のための稀崩壊の測定に重要である¹。Belle 検出器では, Aerogel Cherenkov Counter (ACC) [4] と, 飛行時間検出器 (TOF), 中央ドリフトチェンバー (CDC) の dE/dx の情報を組み合わせて K/π 識別を行っていた。ACC はエアロゲル輻射体からのチェレンコフ光の有無によって荷電粒子の速度がある閾値以上であるかを判定する検出器で, CDC による運動量情報と組み合わせて粒子識別を行う検出器

である。閾値型なので, K/π 識別に着目した場合には特定の運動量の領域のみで識別が可能になる。Belle のバレル部分では TOF が概ね 1.5 GeV 以下の K/π 識別を行い, ACC が 1.5–3.5 GeV の高運動量領域を担当していたが, 前方エンドキャップ領域には TOF が設置されていないため, ACC はフレーバータグで重要になる 0.5–2.5 GeV の運動量領域を担当し, それ以上の運動量領域の識別はできなかった。Belle II へのアップグレードでは, 前方の粒子識別用に ACC にかえて新検出器 ARICH を開発, 導入し, より広い運動量領域に対応しつつ粒子識別性能の向上を図ることとした。

図 1(a) に ARICH の原理を示す。荷電粒子が輻射体であるエアロゲルを通過した際に発生するチェレンコフ光を 20 cm ほど離れたところにある位置分解能のある光検出器で測定することにより, チェレンコフ角 θ_C を測定する。 θ_C と荷電粒子の速度 β , 輻射体の屈折率 n には $\cos \theta_C = 1/(\beta n)$ という関係があるので, 荷電粒子の運動量 p を別に測定すれば, 荷電粒子の質量 $m = (p/c)\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_C - 1}$ を測定でき, 粒子識別を行える。このようにチェレンコフ光の作る像から θ_C を測定して粒子識別を測定する装置を Ring Imaging Cherenkov (RICH) 検出器という。一般の RICH 検出器では θ_C の測定を容易にするため, チェレンコフ光を鏡で反射させるなどして輻射体から光検出器までの距離をできるだけ大きくとるようにすることが多い。しかし, Belle II の ARICH 検出器では, もともと Belle の ACC があった場所にインストールするという制約から, 奥行き 30 cm の空間に装置を収める必要があり, 近接型の RICH という選択になった。

輻射体の屈折率を 1.05 とすると, θ_C は 0.3 rad 程度となるが, 4 GeV の K と π の θ_C は 23 mrad 異なる。検出器の荷電粒子あたりの角度分解能は, 荷電粒子あたりの検出光子数 N_{pe} , 1 光子あたりの角度分解能 $\Delta\theta_C$ を用いて $\Delta\theta = \Delta\theta_C/\sqrt{N_{pe}}$ となるので, これが 23 mrad と比べてどの程度小さくできるかでおおまかな粒子識別性能が決まる。高い粒子識別性能を得るには

¹この記事では K , π はそれぞれ荷電 K , 荷電 π をあらわすものとする

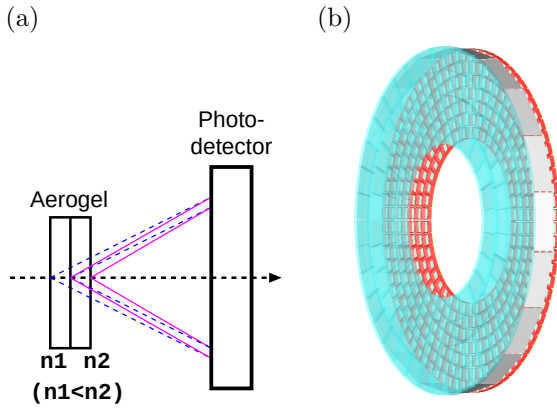


図 1: (a) ARICH の原理。点線の矢印は荷電粒子。屈折率が異なる 2 層のエアロゲルを輻射体に用いることにより、光検出器上でチェレンコフ光のイメージが重なるようになっている。(b) ARICH 検出器。

N_{pe} を大きくすればよく、例えば、より透明で厚いエアロゲルを用いればよい。しかし、エアロゲルを厚くすれば N_{pe} を大きくできるが、チェレンコフ光が厚み方向のどの位置で発生したかという不定性が増えてしまい、 $\Delta\theta_C$ が大きくなって性能悪化の方向に働く。この矛盾を解決するため、ARICH では図 1(a) のように、屈折率の異なる 2 種類のエアロゲルを用いることにした。これにより光検出器上でチェレンコフ光のイメージが重なるようになっており、エアロゲルを厚くしても $\Delta\theta_C$ を悪化させずに N_{pe} を増加させるようになっている。最終的に、ARICH では、屈折率が $n = 1.045$ と $n = 1.055$ で、それぞれ厚さ 2 cm のエアロゲルを用いることとした。

図 1(b) に ARICH の全体図を示す。ARICH は内径 425 mm 外径 1140 mm のドーナツ型のような形をしており、Belle II の前方に位置する。衝突点に近い上流側(図の左側)にエアロゲルが、下流側に 3 節で説明する光検出器 HAPD があり、側面には光検出器の acceptance 外に出て行くチェレンコフ光を反射させるための鏡が設置されている。エアロゲルは一辺 18 cm の正方形のものを扇形状にウォータージェットで切断したものを 248 枚²、光検出器 HAPD は 7 つの同心円状 420 個が設置される。ARICH の Belle II 検出器内での配置を示すと図 2 のようになる。

3 光検出器 HAPD

ARICH で用いる光検出器は、1 光子が検出器可能で、Belle II 内の 1.5 T の磁場中で動作可能でなければならない。また、前述の構成を仮定すれば、5 mm ほどの位置の解像度が必要となる。これらの条件を満たす検

² 前述の通り、屈折率が異なる 2 枚が対になっているので、エアロゲル面で見ると 124 個に分割されている

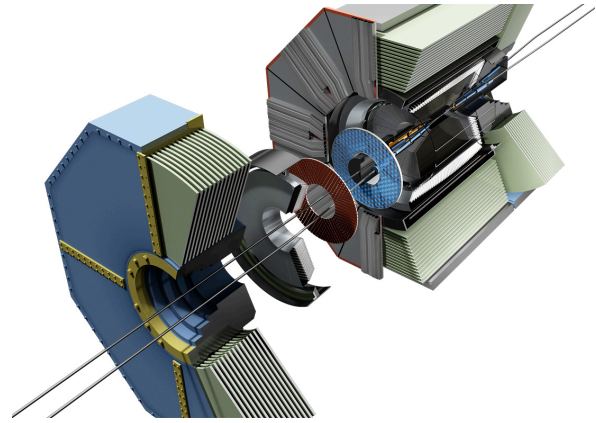


図 2: Belle II 検出器内の ARICH 検出器。内側に見える 3 つのディスク状のものが、衝突点(図の右側)から、ARICH のエアロゲル輻射体、光検出器 HAPD、前方エンドキャップカロリメータ。©Rey.Hori。

出器として、144 チャンネルの角型の Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) [5] を浜松ホトニクスと共同で開発した。

図 3 に HAPD の写真と構造を示す。入射した光は光電面に変換されてできた光電子が、印可された -8 kV 程度の高電圧(以下、HV)で加速され、管内に設置された 4 台の Avalanche PhotoDiode (APD) に打ち込まれる。4 台の APD には、それぞれ独立に 350 V の逆バイアス電圧(以下、バイアス電圧)が印可され、光電子の打ち込みで生成された 1800 程度の電荷がさらに雪崩増幅を起こす。この打ち込みによる増幅と、APD 内のアバランシェ増幅の 2 段階の増幅機構で、合計 70000 程度のゲインが得られる。表 1 に HAPD の仕様を載せる。なお、Belle II は Belle に比べて大きな放射線の影響が予想されており、実験期間とされる 10 年間に 1 MeV 換算で 10^{12} cm^{-2} の中性子を浴びると予想される³ため、APD の構造の改良などにより要求される耐放射線性を備えた HAPD を開発した。

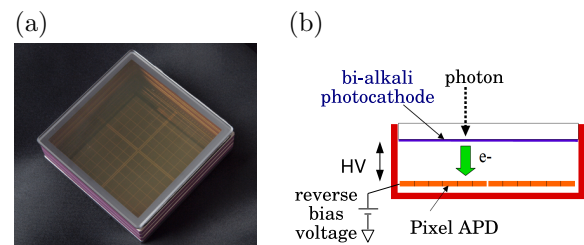


図 3: (a) 144 チャンネル角型 HAPD。(b) HAPD の原理。

HAPD は、光電子の打ち込みによる増幅という機構からゲイン揺らぎが少ないという利点がある一方、ゲイン自体は光電子増倍管よりも低いため、低ノイズ高ゲインの読み出しエレクトロニクスが必要になる。後述

³ このため MPPC (SiPM) は光検出器として採用できなかった。

表 1: HAPD の仕様。

外寸	73 mm × 73 mm
有効光電面	63 mm × 63 mm
光電面量子効率	28 % (24 % 以上)
チャンネル	144 (36 × 4 APD chips)
パッドサイズ	4.9 mm × 4.9 mm
電子照射ゲイン	1800 (1500 以上)
アバランシェゲイン	40 (30 以上)

のとおり ARICH の読み出しチャンネル数は 60480 と多いものの、必要な情報は各チャンネルのヒットの有無だけというやや特殊な条件もあり、ARICH 用に読み出し用の ASIC を開発した [6]。図 4 に読み出しエレクトロニクスの概要を示す。HAPD の裏面に Front-end Board (FEB) と呼ぶボードが直接装着される。この FEB には、開発した ASIC 4 つとデジタル処理用の FPGA が実装される。その後段には Merger Board と呼ばれるボードがあり、FEB 6 台ないし 5 台の信号を収集する。これらは全て ARICH 検出器内部に設置される。Merger には光ファイバーが接続されており、Belle II 実験共通の読み出しプロトコルである Belle2Link で読み出しが行われる。

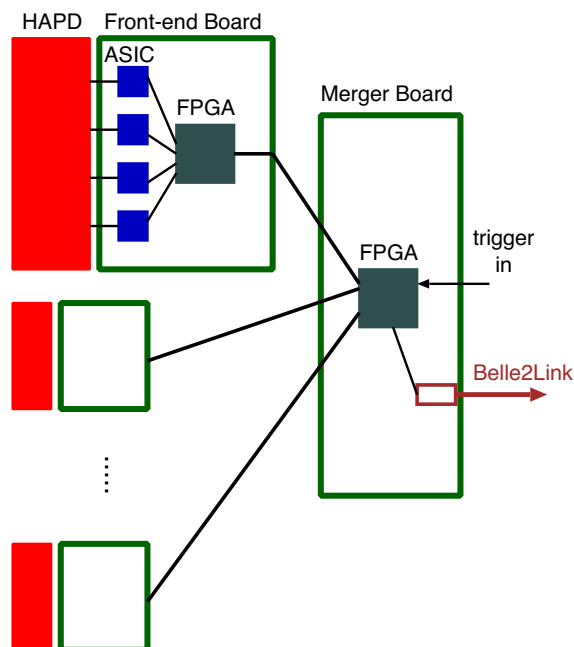


図 4: HAPD 読み出しエレクトロニクス。

4 HAPD の磁場中の振舞

HAPD の量産を開始したあとに分かった問題が、磁場で発生する異常に大きな信号である。量産を始める前

に、KEK の北カウンターホールにある FANTASQUE 磁石で磁場中での HAPD の振る舞いについて調査を行っていた。ここで、いくつかの HAPD について磁場中での正常動作を確認した上で量産に踏み切ったわけである。ところが、量産した HAPD を順次、磁場中でテストしたところ、一部の HAPD が巨大な信号を発生し、読み出しエレクトロニクスを破壊するか、破壊しないまでも 0.1 秒のオーダーで麻痺状態にしてしまうということがわかった。図 5 に信号の例を示す。この症状は、発生頻度に個体差がある、HV を印可した時のみ（特に HV を上げている時と上げた直後に）発生する、1 つの HAPD の全て又は大半のチャンネルに同時発生する、0.1–0.6 T の時が発生しやすい、などの特徴があった。これらから、HAPD の管の側面で電子が雪崩のように増幅される flashover 現象でないかとも考えられたが、4 台の APD に印可するバイアス電圧が均一である方が起こりやすい、というような理解できない特徴もあって、原因を完全には特定できていない。

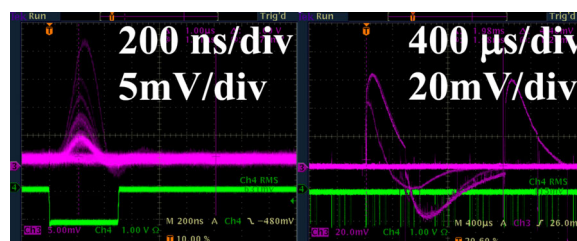


図 5: 磁場中で HAPD でみられた巨大な信号（右）。左が正常な 1~数光子信号。左右で、電圧、時間軸が異なることに注意。

一方で、発生の有無の個体差を理解しようと、浜松ホトニクスにて製造の時期や手順との依存関係などを調査するうちに、問題のある個体についても、ゲッターの再活性を行うとこの問題が劇的に改善することが判明した。ゲッターというのは HAPD 内についているパーツで、ここに電流を流して加熱すると、管内のガスを吸着して真空度を上げることができる。本来は製造の際にゲッターを活性化（加熱）するのであるが、完成後に追加で再度加熱するのがゲッターの再活性化である。そこで、量産された HAPD は一度全数を磁場中で試験を行い、巨大信号問題があった個体については浜松ホトニクスに送り返し、ゲッター再活性を行ってもらい、再度磁場中で試験を行う、という手順で、最終的に必要な個数の HAPD を揃えることができた。

なお、読み出しエレクトロニクスについては、巨大な信号が来ても壊れないように、保護機構を追加することになった。量産後の試験を終えた HAPD は、FEB を装着した上で再度の試験を行ってから、組み立てへと進んだ。

5 ARICH の建設

ARICH の建設は、エアロゲルと HAPD をそれぞれ別のアルミの構造体のなかにインストールしてから、最後に合わせるという手順で行った。建設は、Belle II がある筑波実験棟の地下 4 階の側室で行った。このうち、エアロゲル側は 2016 年のうちにインストールが完了した。

HAPD 側の組み立ては、HAPD に FEB を装着したものを、アルミの構造体に固定するという手順で行った。こちらは、前述の磁場中での問題の他、高電圧のコネクタやケーブルの選定の遅れなどもあり、本格的なインストールは 2017 年以降になった。それでも 2016 年中には一部の HAPD と読み出しエレクトロニクスを構造体にインストールし、テスト用のエアロゲルを用いた宇宙線テストを行い、宇宙線ミュオンの作るチェレンコフリングを観測することができ、基本的な動作を確認することができた。

HAPD のインストール自体は 2017 年 5 月末に完了した。図 6 に、HAPD 側の構造体とともに ARICH グループのメンバーの記念写真をのせる。ARICH グループは、KEK と首都大、千葉大、東邦大、名古屋大、新潟大、スロベニアの Jožef Stefan Institute、フランスの LAL からなる Belle II の中では比較的人数の少ないグループである⁴。この時点では、HAPD の設置された表側から見るとほぼ完成しているが、裏側の読み出しエレクトロニクスはまだインストール中、という状況で、HAPD と一体化されている FEB 以外の Merger やケーブルのインストールはこのあとも続き、7 月末にようやく完成した。

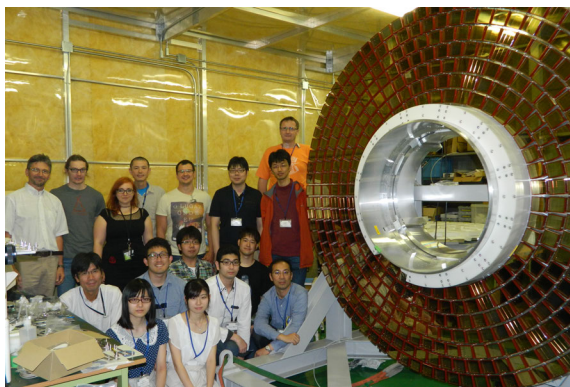


図 6: HAPD のインストールが完了した ARICH の光検出器側の構造体。

2017 年 8 月 9 日に ARICH のエアロゲル側と HAPD 側の合体を行った（図 7）。ちなみに、エアロゲル側の全体を見ることができたのはこの日だけであった。これ以降、エアロゲルや HAPD には修正を加えることは

できなくなったが、読み出しエレクトロニクスにはまだアクセス可能であり、このあと 1ヶ月程度の間、ケーブルの最終的なインストールや、データ収集のテストを行いながらエレクトロニクスの調整などを行った。図 8 に、ARICH の裏側のエレクトロニクスの写真をのせる。HAPD の背面には 5 cm くらいの空間しかなく、ここに、Merger Board や読み出し用のケーブル、高電圧関係のケーブルやボードの電源用のケーブルなどを収める必要がある。写真はケーブルのインストール途中の様子で、最終的にはさらに複雑な様子になった。その一因は、HAPD 1 台につき、高電圧と 4 つの APD のバイアス、保護用のガード電圧の 6 種類の電圧が必要になるからで、これらのケーブルは検出器外部に引き出す必要があり、このあとも Belle II 検出器内の限られたスペースに取り回すのに苦労した。なお、エレクトロニクスのインストールが終わると、ARICH のエレクトロニクス側もアルミの板で蓋をして、検出器としては完成である。



図 7: ARICH 検出器のエアロゲル側と HAPD 側の合体の様子。

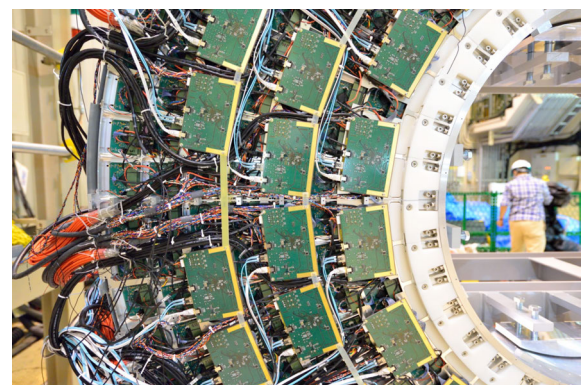


図 8: ARICH 検出器のエレクトロニクス。

その後、9 月 13 日に ARICH を前方カロリメータと合体させ（以後、前方エンドキャップと呼ぶ）、9 月 20 日に Belle II 検出器内へのインストールをした。といっても、前方エンドキャップは、Belle II 検出器内の内部の検出器へのアクセスを可能にするため外側に引き出したり、定位置に押し込んだりできるようになっており、こ

⁴建設当時。その後、北里大とアルメニアの Alikhanyan National Science Laboratory も加わった。

の時点では外側であって、まだケーブルなどが接続されていない状態であった。前方エンドキャップを定位置に押し込むのにも、(ARICH だけの問題ではないが) ケーブルや配管の干渉があって一苦労あったのだが、それは省略することにして、10 月末と 12 月に定位置に入れてのケーブルの接続およびコミッショニングを行った。この時期は、Belle II の崩壊点検出器⁵などの作業と並行しておこなっていたため、そちらの作業の関係上、前方エンドキャップを外側に引き出している期間も長かったが、その間は延長ケーブルなどを使って部分的に読み出しテストなどを行った。年をまたいだ 2018 年 1 月末に前方エンドキャップを定位置に移動し、ケーブルを接続して、いよいよ Phase 2 運転に備えることとなった。

6 Phase 2 での ARICH の運転

SuperKEKB の Phase 2 運転開始は 2018 年 3 月 19 日であったが、Belle II ではその前から宇宙線を用いたコミッショニングを行っていた。Belle II でトリガーされる宇宙線で ARICH で検出できるものは、ARICH の下半分を通過するものに限られるが⁶、図 9 のように ARICH を通過した宇宙線が作ったチェレンコフリングを検出したイベントを観測することができ、一応 ARICH が動作することが確認できた。

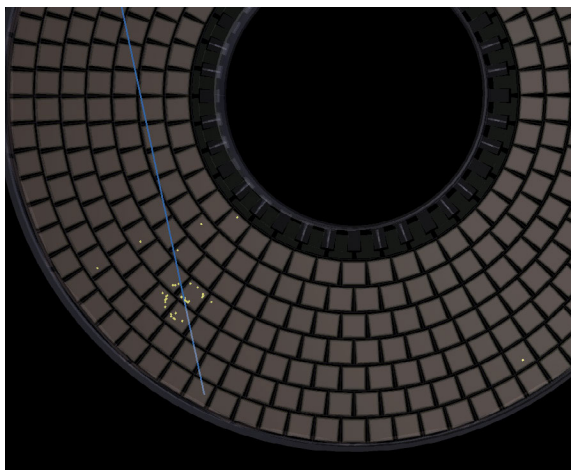


図 9: Belle II インストール後の宇宙線データで確認された ARICH のチェレンコフリング。青線が宇宙線。

Phase 2 運転では、4 月 26 日に SuperKEKB 初の電子陽電子衝突事象を観測し、7 月 17 日まで運転を行った。この間、ARICH もデータ収集を継続してコミッショニング運転を行ったが、いくつか問題を抱えており、本格運転とは言えない状態であった。

⁵冒頭で Phase 2 ではインストールしないと述べたが、実際にはテスト的に一部がインストールされた

⁶宇宙線は衝突点近辺を通過しないとトリガーされない。上半分を通過するのは ARICH を背後から通過するので、チェレンコフ光が HAPD 側に放出されない。

最大の問題は、エレクトロニクスの冷却が不十分で、ARICH 内の温度が上昇してしまったことである。これは、前方エンドキャップの Belle II インストール後にはわかったことではあるが、全てのエレクトロニクスを動作させようとすると、FPGA の温度は 60–70 °C に達し、数時間で内部の温度が 50 °C 近くまで上昇してしまう。そこで、Phase 2 では ARICH 全体を動作させるのはあきらめて、一部だけを動作させることにした。図 10 が、Phase 2 での ARICH のヒット分布で、図の左右にあるような 2 種類の構成で運転していた。ここで、括弧内がかかっているのがセクタ番号で、1 セクタが ARICH の 1/6 に相当する。つまり、Phase 2 では、テスト目的で数時間だけ全セクタを動作させることはあったが、通常は 6 セクタ中 3 ないし 4 セクタだけを動作させていたのである。

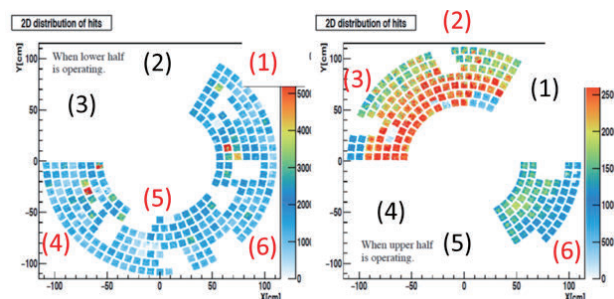


図 10: Phase 2 での ARICH のヒット分布。冷却の問題のため Phase 2 では一部のセクターのみ運転していた。異なる期間のものを 2 通り示す。括弧内はセクター番号。

また、読み出しにも問題が見られた。420 台の HAPD の読み出しは、72 台の Merger Board から Belle II 共通の読み出しプロトコルである Belle2Link を用いて光ファイバーで読み出しているのであるが、このうちの 10 台ほどの Merger に問題があった。その症状は、全く動作しないものから、ラン開始後短時間でエラーになるものなど様々であったが、Phase 2 ではこれらの読み出しは断念せざるを得なかった。図 10 にて、HAPD 6 台くらいの固まりでヒットが無い場所が多数存在するのはこのためである。この他、ファームウェアが不安定であるなどの問題もあったが、これらは Phase 2 中にデバッグを行い、徐々に修正を行った。

このような状況であったが、不完全なデータではあるが ARICH のデータの解析を行い、ソフトウェアの整備や、アラインメント、データベースの整備などを行い、一通りのフローを確認することができたので、有意義であった。また、稼働している部分に着目して、検出光子数やチェレンコフ角分布などの基本的なパラメータを確認したところでは、概ねシミュレーションの予想値に近い値が得られていたので、全体を動作させることができた。

れば、目的の性能が得られそうだ、という感触はあった。

いずれにせよ、前述の問題を解決するには、再度ハードウェアに修正を加える必要があったので、Phase 2 終了後の Belle II の崩壊点検出器のインストールの時間を利用し、前方エンドキャップを一旦 Belle II からアンインストールして解体し、ARICH のエレクトロニクス側に修正を加えることとした。

7 Phase 3 での ARICH の運転

Phase 2 運転が終了して ARICH を取り出すと、直ちに ARICH の改修にとりかかった。最大の問題は冷却能力不足であるが、問題が判明してから、LAL のエンジニアの協力を得て、新しい冷却系の開発にとりかかっていた。ARICH で発生する熱のほぼ全てはエレクトロニクスによるもので、中でも FEB と Merger に実装されている FPGA がかなりの部分を占めるが、最初のはこれらを直接冷却する構造になっていなかった。新しい冷却系は以前と同じ水冷式ではあるが、Merger の FPGA をアルミの治具を介して直接冷却できるようにした。FEB の FPGA は直接は冷却できないが、FEB の FPGA と ARICH の構造体の間に熱伝導体を加えて FPGA の熱が構造体に逃げるようにし、Merger の FPGA を冷やす治具が構造体からの熱も取り除けるようにした。Merger やケーブルを一旦全て取り除いてから、この新しい冷却系をインストールしたところ、FPGA を含む ARICH 温度も 40°C 以下に保つことができた。

また、Merger の読み出しの不具合については、この機会に調査をした結果、大半はトリガーやタイミングを担っているケーブルの不良であることが判明した。Phase 2 前には試験に十分な時間がとれなかった他、読み出しのソフトウェアも開発途上だったこともあり、見逃されていたものと思われる。不良ケーブルの交換などをおこなった結果、Phase 3 では全ての Merger から安定してデータを読めるようになった。

これらの ARICH の改修を終え、2018 年内に前方エンドキャップは再度 Belle II にインストールされた。この間に崩壊点検出器のインストールも完了し、ついに Belle II 検出器が完成したのである⁷。2019 年 3 月 11 日に SuperKEKB の運転がはじまり、ここに Phase 3 運転すなわち Belle II の本実験がはじまったのである。

図 11 に Phase 3 での ARICH のヒット分布を示す。Phase 2 と異なり、ARICH 全体が稼働しており、Merger の不具合による大きくヒットが抜けた領域などもない。内側の方が、バックグラウンドイベントの影響でヒットレートの高いのがわかる。一部、HAPD 内の APD の単

位 (HAPD の $1/4$ に相当する 36 チャンネル単位) でデッドチャンネルがある。その主な原因は HAPD 内の APD そのものの不良でバイアス電圧をかけられなくなっているのであるが、そのような APD は全体の 1% 程度である。この他に、ケーブルの不良と疑われるもの、HAPD や ASIC のデッドチャンネルの他、ソフトウェア的な問題なのかランによっては動作しない HAPD などがあるが、それらを含めても不良チャンネルの割合は全体の 2% 以下で、粒子識別性能への影響は軽微である。

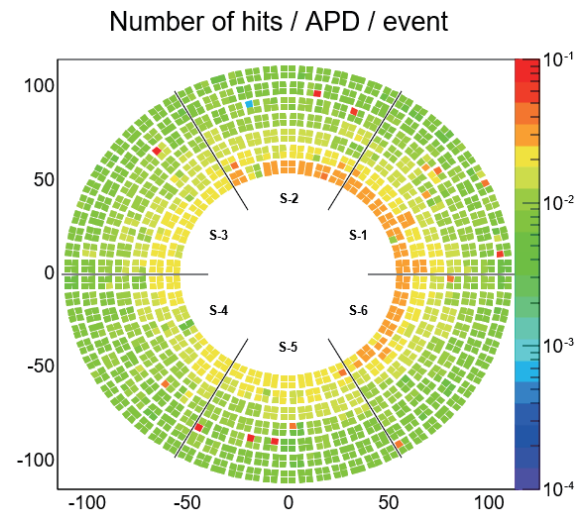


図 11: Phase 3 での ARICH のイベントあたり APD あたりのヒット分布。ところどころヒットが多い APD はノイズの多いチャンネルを含んだもの。縦軸、横軸の単位は cm。

また、Phase 2 中ではファームウェアの問題があるなど、ARICH の、というよりどの検出器も、データ収集は不安定であり、運転中に問題が生じた場合に Belle II のデータ収集から外されてしまうことも時々あったが、Phase 3 では常に Belle II のデータ収集に組み込まれて動作している。7 月 1 日まで行われた 2019 年の春の運転では、細かな問題や発生頻度の低い問題はあっても、安定に動作したといってよい状況である。

最後に、2019 年の春の運転で得られた ARICH の性能について記す。なお、以下の結果は暫定的なものであり、今後のキャリブレーションやアラインメントなどで値は変わる可能性がある。また、ソフトウェアの改良によって、結果も改善することが予想される。

図 12 は、 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ イベントで得られた ARICH の光子のチェレンコフ角分布である。シミュレーションでは、荷電粒子あたりの光子数 $N_{pe} = 11.3$ 、1 光子あたりの角度分解能 $\Delta\theta_C = 12.8$ mrad に対し、データでは $N_{pe} = 11.4$ 、 $\Delta\theta_C = 12.7$ mrad が得られている。これは、荷電粒子あたりの角度分解能 $\Delta\theta = \Delta\theta_C / \sqrt{N_{pe}} = 3.8$ mrad に相当し、単純計算では 4 GeV の粒子に対して、 6.1σ の K/π に識別能力ということなる。なお、

⁷但し、崩壊点検出器の 2 層めに位置するピクセル検出器の一部のインストールは次の機会に先送りになった。

図 12 の $\theta_C = 0$ 付近のピークは HAPD の窓材で発生したチェレンコフ光の寄与で、シミュレーションとデータに乖離が見られる。こういったことを含め、検出器の完全な理解にはさらなる研究が必要である。

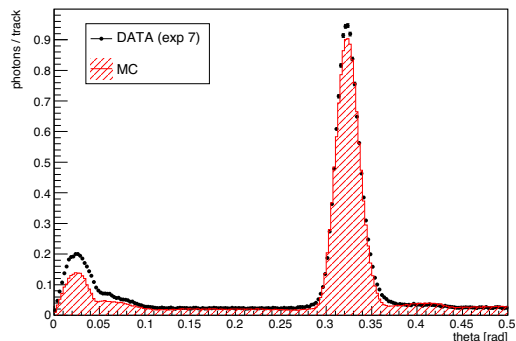


図 12: Phase 3 でのチェレンコフ角分布。縦軸は arbitrary。

また、図 13 は $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_{\text{slow}}^+$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ (荷電共役を含む) を用いて得られた ARICH の粒子識別性能である。このモードのよいところは、 π_{slow}^+ の電荷を見れば、 D 中間子の崩壊によって出てくる K, π の電荷がわかるため、 K/π の識別性能と誤識別率を同時に求めることができることである。図では、異なる K 識別の選別条件に対する K の識別効率と、 π の K への誤識別率が示されている。この図は 0.7 GeV 以上の粒子を集めたもので、粒子識別性能の理解のためには、運動量との依存関係をみないといけないが、ともかく実際に K/π 識別を行うことができていることを示している。

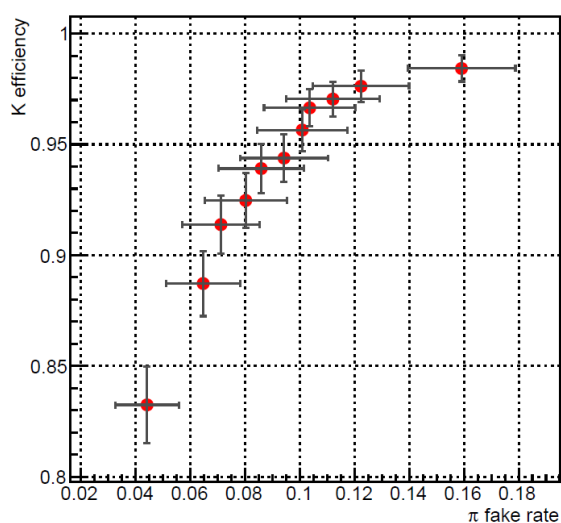


図 13: $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_{\text{slow}}^+$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ を用いた ARICH の粒子識別性能。

8 おわりに

Belle II の Phase 3 が始まり、この春に 3ヶ月程度の運転を行った。運転時のルミノシティは典型的に $3\text{--}5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度で、 6.5 fb^{-1} のデータを収集した。この間、Belle 実験で行っていたような continuous injection (Linac からの入射を行いながら、電子と陽電子の衝突を行う運転) でのデータ収集に成功するなど、本格的なデータ収集の準備が進んでいる一方で、ビームバックグラウンドが高く、Belle II の検出器を動かした状態でルミノシティを上げることができないという課題がある。実際、春の運転の最後には SuperKEKB は $1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ という KEKB の設計値以上のルミノシティを記録したものの、この時には Belle II 検出器は高電圧をかけていない状態であった。

ARICH は、Phase 2 でみつかった問題を克服して、Phase 3 では予想以上にうまく動作している。しかし、Belle II の目標とするルミノシティは $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、蓄積するデータ量は 50 ab^{-1} であるから、まだほんの第一歩を踏みだしたところである。今後、より高いバックグラウンドと高いルミノシティのもとで、トリガーレートやデータのバンド幅が増えた状況でも、安定して動作させるように、努力したい。

参考文献

- [1] Z. Doležal *et al.*, "Belle II Technical Design Report", arXiv:1011.0352.
- [2] A. Abashian *et al.* (Belle Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A **479**, 117 (2002).
- [3] T. Iijima *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **548**, 383 (2005); S. Nishida *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **766**, 28 (2014); S. Iwata *et al.*, PTEP **3**, 033H01 (2016).
- [4] T. Iijima *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **453**, 321 (2000).
- [5] S. Nishida *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **610**, 65 (2009).
- [6] S. Nishida *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **623**, 504 (2010).