

Belle 測定器：20 世紀最後のコライダー検出器

KEK 素粒子原子核研究所

幅 淳 二

junji.haba@kek.jp

2011 年 11 月 11 日

1998 年 12 月 KEKB リングに最初のビームが蓄積されたころ、筑波実験室ではロールアウトポジションにおいて Belle 測定器が組み上げの最終段階にはいったところであった。余談ながらそれは筆者にとっていろんな意味で記憶に残る月であった。旧国鉄の債務返済のためタバコ的大幅値上げが実施され、ついに禁煙を決断したのもこの時である。完成された Belle 測定器は宇宙線によるコミッションングを経て翌年 5 月ついにロールイン、待望の衝突実験は開始された。それから 2010 年 6 月 30 日に KEKB 加速器と Belle 実験の運転が終了するまでの 11 年間、様々なトラブルに見まわれながらも着実なアップグレードを続けて、毎月のようにルミノシティ記録を塗り替える KEKB から大量の衝突事

象を受け止め続けてきた。本稿ではその Belle がどんな測定器システムであったかを改めて振り返ってみたい。

TRISTAN の VENUS, TOPAZ, AMY に続く日本で 4 基目の電子陽電子衝突実験用測定器で、しかも過去類を見ない非対称エネルギー（電子 8GeV + 陽電子 3.5GeV）衝突実験に最適化された Belle 測定器では、衝突点は測定器中心からオフセットし、重心系のブースト方向（電子の進行方向）に広いアクセプタンス（ $17^\circ - 150^\circ$ ）を確保する。一方で衝突点に向けビームの強い収束を実現するために、超伝導四極電磁石（QCS）が測定器中心近くにまで挿入されている（図 1, 2 参照）。

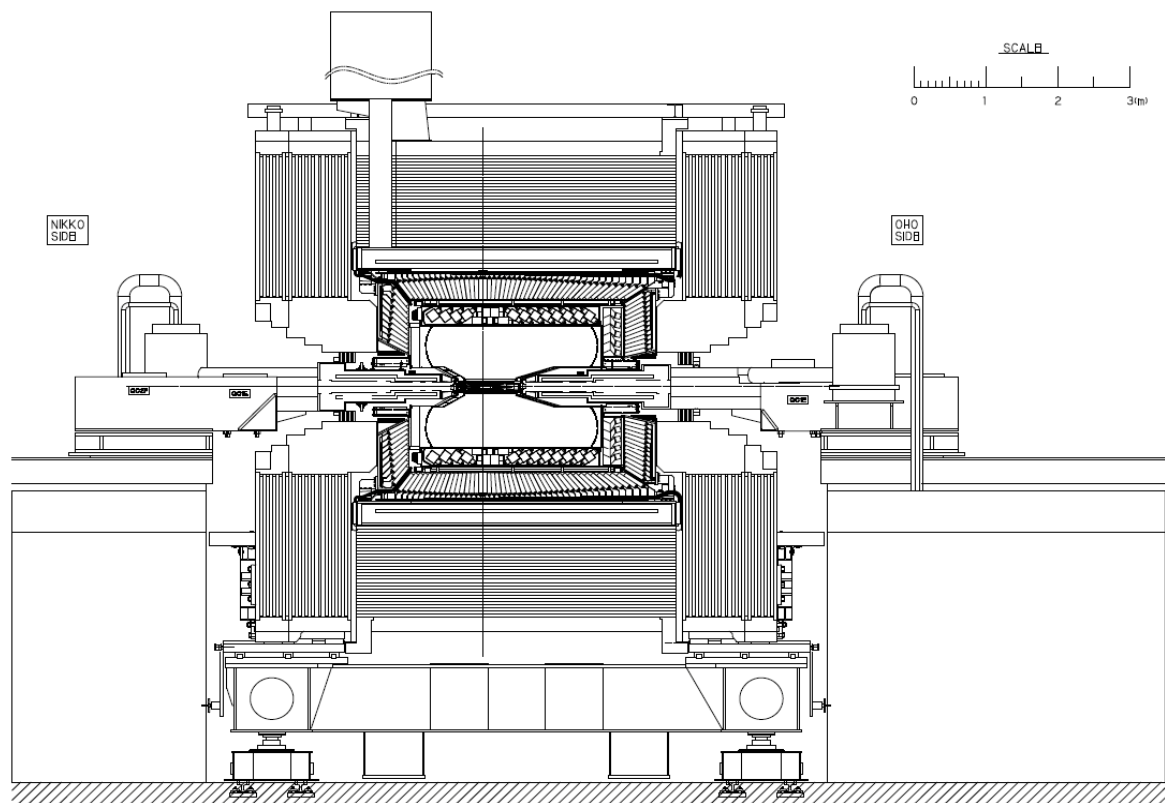


図 1 Belle 測定器の断面図：衝突点は測定器中心より陽電子方向にシフトして、ブースト前方にアクセプタンスを確保していた。前後方には QCS のクライオスタットが挿入されている。

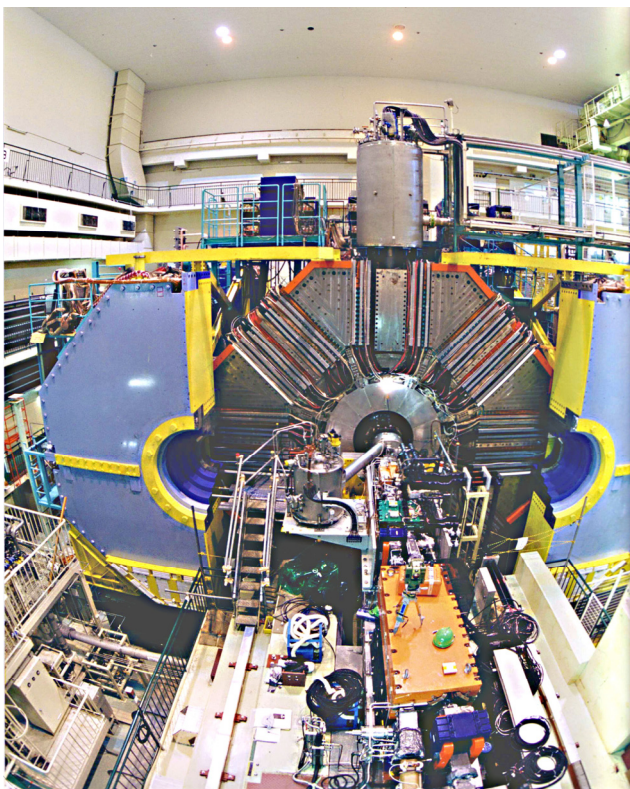


図2 メンテナンス中の Belle 測定器

内部検出器サブシステムの構成は、衝突型測定器としては標準的なものである。衝突点の加速器真空を封じるベリリウムのビームパイプ、それを取り囲むバーテックス検出器 (SVD, 当初 3 層, 2003 年より 4 層のシリコンストリップセンサーで構成) が中心軸に据えられる (図 3)。

その外側に、ヘリウムガスをベースにして、 $16 \times 17 \text{ mm}^2$ 角の 8400 の矩形セルをアルミのフィールドワイヤで構成し、物質量を極限まで減らした円筒ドリフトチェンバー (CDC) が続く。QCS の挿入に対応する変則的な形状のエンドプレート (図 4) を採用して 17° 超前方までのアクセプタンスを確保している。

Belle 測定器で特徴的なのは、B 中間子とその崩壊モードを高効率で識別するための優れた粒子弁別能力である。そのための技術開発、技術選択はギリギリまで続けられたが、

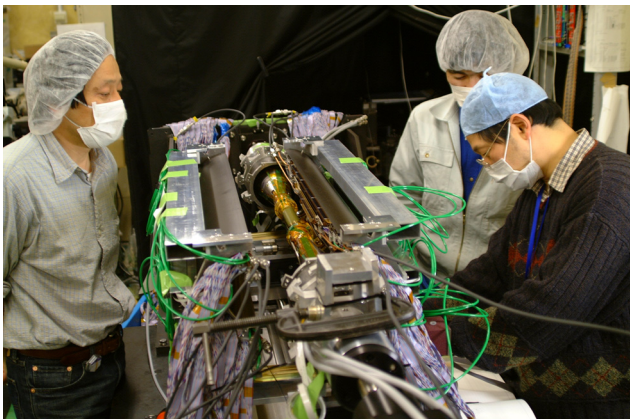


図3 SVD2 と衝突点ビームパイプ

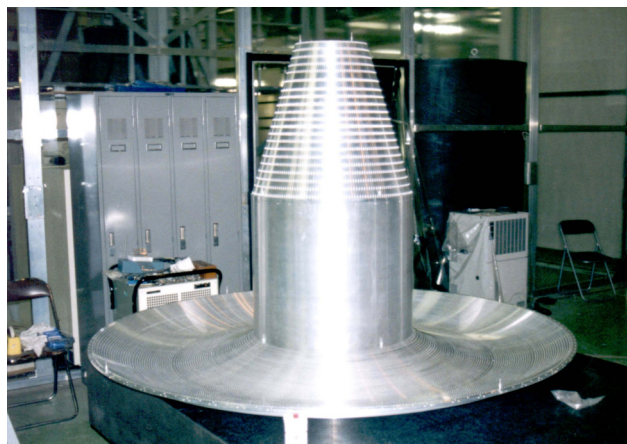


図4 極めて異型の Belle-CDC エンドプレート。中央のコニカルパートに QCS が挿入される。衝突点から 17° 方向までのアクセプタンスを可能とするため、急峻な円錐部にもワイヤーが張られる。

最終的には日本のお家芸でもあるエアロジェルチェレンコフカウンタ (ACC) とプラスチックシンチレータによる TOF カウンタの組み合わせに落ち着いた。ACC の衝突型測定器での本格的な採用は世界初めてのことであり¹、その構造設計や光電子増倍管の高磁場中での使用など大きなチャレンジであった。960 台のカウンタモジュールは、エアロジェルブロックと強磁場中で動作可能なファインメッシュタイプダイノードを使用した光電子増倍管 (FMPMT) を組み込んだ薄板アルミの筐体で構成されている (図 5)。重心系のブーストに起因する運動量分布の角度依存に対応するため、ブロックの屈折率を 1.008 ~ 1.030 まで角度領域により変化をつけるなどの細かい配慮がなされた。

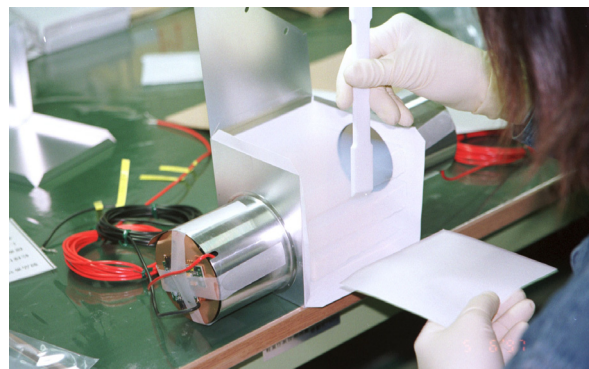


図5 ACC モジュール・薄板アルミのボックスに装填されたエアロジェルブロック (中央) を FMPMT が覗く。

TOF カウンタは 4 cm 厚 $\times 6 \text{ cm}$ 幅 $\times 255 \text{ cm}$ 長のプラスチックシンチレータロッド 128 本を樽状に組み合わせたもので、 100 psec の時間精度を提供する。Belle 測定器システム全体にイベントの時間レファレンスを与える重要な使命も帯びており、バックグラウンド計数低減のためコインシデンスを取る薄いシンチレータ (TSC) と二層化されていた。ACC と同様磁場に強い FMPMT が採用されている (図 6)。

¹ TASSO 実験で限定的な採用の例はあるが、バレル部での本格的な導入は初めてである。

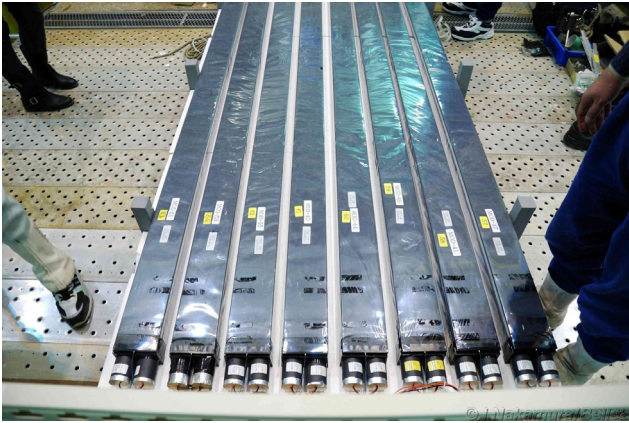


図6 13年振りに取り外されたTOFカウンター。2本のロッドを一組としてTSCと組み合わされている。

粒子識別システムの外側にはソレノイドマグネットに内接するように据え付けられたカロリメータ(ECL)がある。 B 中間子の崩壊モード識別には π^0 の効率的な同定は欠かすことができないため、低エネルギーから高分解能が得られるCsI(Tl)結晶シンチレータが採用された。その発光波長は565nmと長く光量も十分にあり、しかも高磁場中での使用となるため、読み出しには大面積のPINフォトダイオードをそれぞれの結晶に二個ずつ装着してカウンタモジュールを構成した(フロントエンドエレクトロニクスも二個独立にするリダンダンシーのお陰で、12年間の運転を通して全8736カウンタにデッドモジュールなしという偉業を達成することができた)。総重量36トンに及ぶモジュールはその性能を損なうことがないように、アルミニウム製1.6mm厚の内壁と0.5mm厚の隔壁を巧妙に組み合わせた、野心的に軽量化された容器に収められた(図7)。しかしその軽量化がまた多難な挑戦をもたらしたことは忘れることができない(後述)。

ソレノイドは半径1.8m、長さ4mの空間に1.5Tを生成する。この磁場強度は優れた運動量分解能と広い運動量アクセプタンスという相反する要求の妥協点から決められた。コイルにはSDCに向けて開発されてきたアルミ安定化超電導線材の技術が活用された。



図7 アルミ薄板で作られたECLコンパートメント。中央の列に結晶モジュールがインストールされているのが見える。

ソレノイドの外側には、磁束のリターンヨークとして鉄の構造体が構える。Belleのもう一つの特徴は、このヨークを厚さ47mmの鉄板とResistive Plate Counter(RPC)の14段の積層構造としたinstrumented iron yokeを構成していることだ。これは通常の μ 検出器としてだけでなく、重要な B 中間子崩壊モードである $B \rightarrow J/\psi K_L$ からの中性 K 中間子を一種のハドロンカロリメータとして検出できるものとしてKLM(K_L and Muon detector)と名付けられている。RPCは抵抗値の大きな($10^{10} \Omega\text{cm}$ 以上)プレートを2mm程度のガスで満たしたギャップで積層し、その間に10kV程度の高電圧を印加して、そこからのストリーマ信号を検出する。Belleの設計当時、RPCはイタリアの得意技でベークライト板に特殊なオイルを塗って電極とするのが流儀であったが、Belleでは世界に先駆け低抵抗ガラスを採用した。今日ではこちらが主流になりつつあるようだ。RPCは電極プレートの高抵抗によるセルフクエンチが検出器動作の基本だが、それゆえ計数率の制限が強く、実験後期の設計ルミノシティを超える運転では、内層や加速器トンネルに面したエンドヨーク最外層で検出効率の低下を招くことになった。

以上の平行検出器群の前後方をさらに、エンドキャップ検出器がカバーする。非対称衝突のブーストにあわせて、後方は 150° までをやはりCsI(Tl)結晶のカロリメータで、前方は高運動量の K/π 分別を行えるよう1.03という高い屈折率のACとCsI(Tl)結晶のカロリメータで 17° までをきっちりと覆った。

こうした中核の検出器の陰で、コミッションングやビームスタディに重要な働きを果たしたのが、QCSの端面に取り付けられた超前方カロリメータ(EFC)と文字通り電子ビーム衝突軸延長上で、Radiative Bhabha散乱からの光子を測定するゼロ度ルミノシティモニター(ZDLM)がある。EFCはKEKB運転開始時に最初のBhabha散乱の信号を確認して、製作に携わったチームの母国、台湾ではちょっとした新聞記事の話題を提供できた(図8)。ZDLMは速いサンプリングでルミノシティのオンライン情報や、4nsec間隔のパンチ毎ルミノシティを加速器に提供して、KEKBのめざましいルミノシティ向上に大きく貢献した。

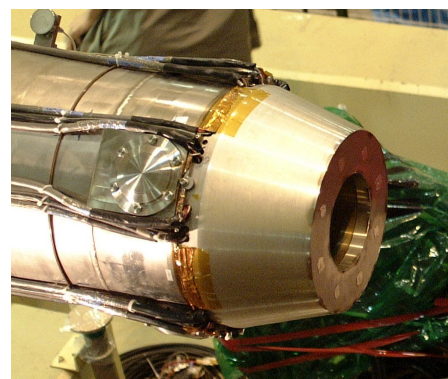


図8 QCS先端に取り付けられたEFC

以上 Belle 測定器システムの設計の概要²を振り返ったが、その4年にわたる建設と10年余に及ぶ運転の道のりは決して平坦なものではなかった……と展開するのがこの種の報告の定型であろうが、実のところまさにそのとおりだった。しかも Belle には最初からライバルとして運命づけられた BaBar がおり、その先陣争いは否が応でも熾烈なものとなった。建設時における大きな試練は三つ。一つはソレノイドマグネット据え付け後に発覚した内部配管のリークと現場でのクライオスタット開腹手術、続いてはカリリメータ組立て途中でのサポート容器崩落事故とその再製作・再組立て、そして当時国内に技術的蓄積の少なかった SVD の終盤における設計変更である。いずれも BaBar に大きく遅れをとる可能性を持つ重大トラブルであったが、対策チームの不眠不休の作業により、KEKB 加速器の立ち上げに遅れること1ヶ月、1999年1月にはなんとか宇宙線による総合運転を開始することが可能となった。その年の5月には BaBar に遅れをとることなく衝突点エリアへロールイン。いよいよ実験開始、苦しかった建設のフェーズもどうにか収束かと思った矢先、新たな困難が降りかかる。SVD の早すぎる昇天だった。当時の民生 LSI 技術では IC の放射線耐性は極めて低く、軍用の特殊なプロセスだけが高い耐性を可能とされていた。初代の SVD に用いられたチップはこの民生技術による低耐性のものであったことに加え、ビームパイプ1号機のシールド性能にも弱点があり、それにビームバックグラウンドスタディのために立てた大きなバンブ軌道が追い打ちをかけることになったのだ。禁煙を始めたばかりの我が身には、堪えるにはあまりにも苛酷なストレスとなった。不幸中の幸い、低耐性チップでの不測の事態に備えバックアップ(SVD1.2)はすでに準備中であつたため、その夏のシャットダウンにおいて辛うじて交換作業を行うことができ、大きな遅滞を生ずることは免れた。その後 LSI の微細化に伴う高耐性チップへのアップグレード、更に2003年の SVD2 へのアップグレードを経て測定器システムはなんとか安定運転期を迎えることができた。

KEKB の驚異的なルミノシティ向上にともなって、実験チームで声に出せない悲鳴を上げたのはデータ処理に関わるシステムである。これはトリガー、DAQ、そして計算機・data storage を含むストリームであり、どこにボトルネックがあってもたちまち破綻をきたす。そもそも当時もてる技術を結集した TRISTAN に比べてさらに二桁近く高いデータレートを処理することが課せられており、その実現性について計画当初は疑問視する向きさえあつた。しかし幸いにして20世紀末から始まった IT 技術の進展は目覚しく(図9)、我々も大きくその恩恵に浴すことができた。またデッ

ドタイムを最小にするパイプラインエレクトロニクスの採用と PC ファームによる event builder システムの構築により、データ収集システムのデッドタイムは格段に改善された(図10)。

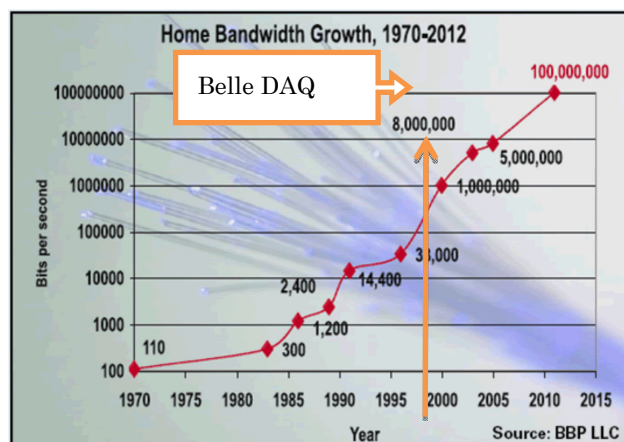


図9 「一般家庭」におけるネットワークバンド幅の変遷と1999年に設計された Belle の DAQ スペック。

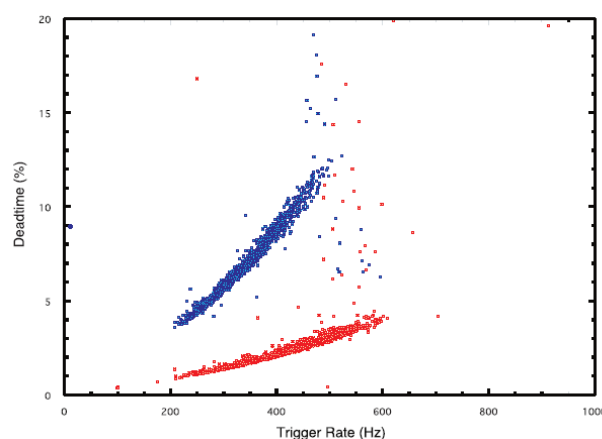


図10 DAQシステムのアップグレードでデッドタイムは大きく(青(上) 赤(下))改善した。

大艦巨砲の ATLAS/CMS など LHC の検出器や、「夢の超高性能」を目指す ILC 検出器の陰で地味な存在の Belle 測定器であるが、その性能は完成後10年以上を経た今も実は十分 competitive である。図11に示したのは、現代の代表的な測定器システムにおけるバーテクス分解能である³。ILDを除いて、実際に達成された性能(あるいはその外挿)である。フレーバー物理を主眼とする Belle と LHCb が低い運動量から良好な性能を発揮していることが見て取れる。一方「重量級」の ATLAS・CMS ではふんだんな物質量が災いして10 GeV/c 以下の測定を相当にスポイルしている。またILDの目指すものがいかに野心的であるかもこの比較からよくわかる。

² Belle 検出器のシステムは Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 479 (2002) 117-232 に詳しいまとめがある。

³ Junji Haba, PoS ICHEP2010:542,2010.

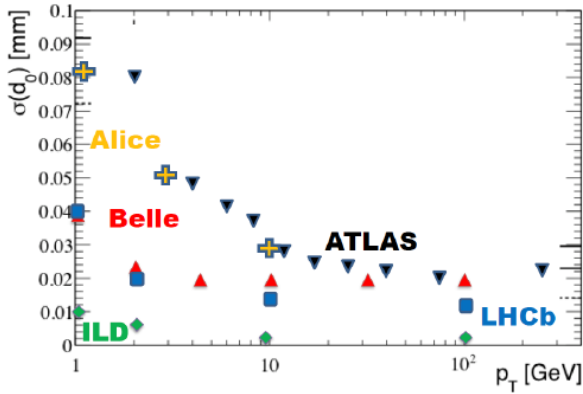


図 11 代表的な検出器システムのバーテックス分解能
Belle, LHCb, ATLAS, Alice, ILD

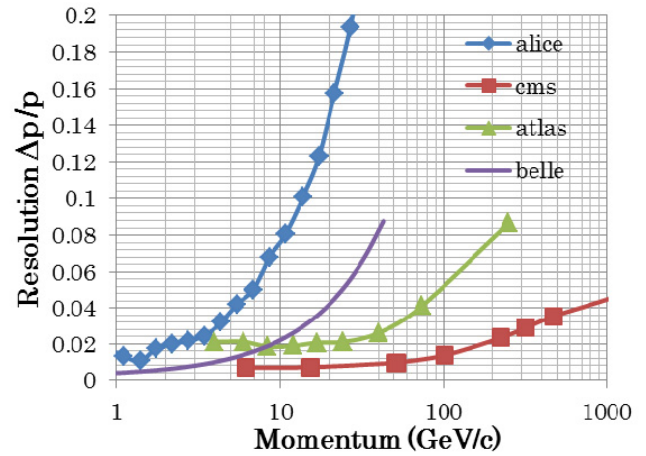


図 12 代表的な検出器システムの運動量分解能

同様の比較を運動量分解能についても行うことができる。図 12 に Belle で得られた運動量分解能とその外挿が LHC の検出器システムで達成されたものと共に示されている。10 GeV/c をはるかに超える高運動量領域では、さすがに高い磁場と長いレバーアームを持つ CMS や ATLAS に挑むまでもないが、低運動量では世界最高性能と評判の TPC を有する ALICE も寄せ付けない高分解能を發揮している。これも CDC にヘリウムガスとアルミワイヤーを使うなど Belle 測定器の徹底した軽量化とバランスがとれたソレノイド磁場が功を奏したものだといえる。

2010 年 12 月 19 日 Belle 測定器は、アップグレードのためのロールアウトを行った。1999 年 5 月ロールイン以来 11 年半ぶりの任務解除であった(図 13)。

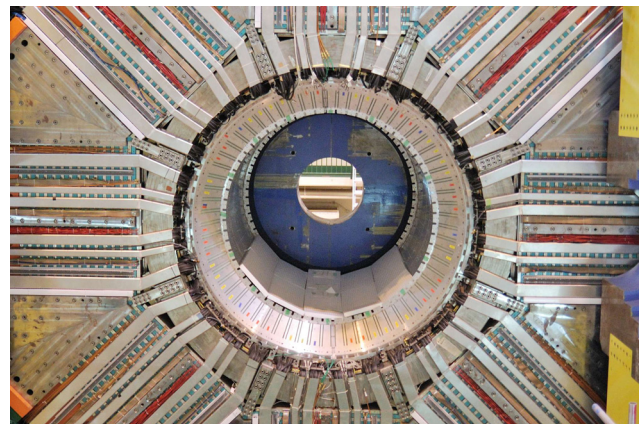


図 13 2010 年 12 月のロールアウト後、内部検出器の解体を終えた Belle 検出器(2011 年 9 月撮影)。カロリメータより内側にポツカリと空間ができて、新しい測定器のインストールを今や遅しと待ち焦がれている。