

1 訃報 — 高崎史彦名誉教授、原隆宣教授

高崎史彦名誉教授が 2026 年 1 月 21 日に逝去されました。高崎先生は 1990 年代初頭に KEK において B ファクトリー実験の創設に尽力され、Belle 実験の初代スポークスマンを務められました。Belle 測定器建設時にはさまざまな困難に会いましたが、高崎先生の陣頭指揮のもと、Belle 実験は B 中間子の CP 対称性の破れの測定を成しとげました。高崎先生がいなければ、今の Belle II 実験は存在しなかったでしょう。訃報を受け、Belle/Belle II 実験のメンバからも多数の悲しみの声が寄せられました。ここに謹んで哀悼の意を表します。

また、原隆宣教授が、何年にもわたる闘病ののち、2026 年 4 月 7 日に逝去されました。原教授は、Belle II の立案当初から計算機システムの構築と運用を牽引し、長年計算機コーディネータも務められました。Belle II 実験の各国の計算機システムの立ち上げなどにも尽力され、世界的なグリッドシステムを作り上げました。原教授がいなければ、今の Belle II の計算機環境は存在しなかったでしょう。3 月までは闘病しながらも仕事をされており、突然の訃報に、Belle II 実験の世界中のメンバーから多数の悲しみの声が寄せられました。ここに謹んで哀悼の意を表します。

2 Belle II 衝突運転中!

SuperKEKB と Belle II 実験は、今夏までに 1 ab^{-1} のデータを蓄積することを最優先の課題として運転を続けています。

2025 年は 10 月まで SuperKEKB と Belle II の運転を停止していました。2025 年 11 月 5 日にメインリングの運転を再開し、真空焼き出しを行った後、18 日から衝突運転を開始しました。2024 年の運転で苦しめられていた Sudden Beam Loss の主要原因とされていた真空シール材を夏のシャットダウンで取り除いた効果はてきめんで、Sudden Beam Loss の回数は、2024 年の運転と比べ大幅に減少しました。2025 年の期間中は瞬間ルミノシティの最高値は $3.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で、 24 fb^{-1} のデータを蓄積し、2025 年末時点での総データ量はオンラインの暫定値で 599 fb^{-1} になりました。

11 月 25 日にはアボートキッカーの電源障害を起因とするビームアボートにより、予期せず加速器各部や測定器が非常に強い放射線を浴びました。Belle II には損傷はありませんでしたが、その後、最終収束超伝導電磁石 (QCS) の冷却システムに不具合が生じ、週 1 回のメンテナンスを要する状況で運転を続けました。年末年始には、QCS 等の冷却を保ったまま停止期間を最小限にするという当初の予定を変更して、冷却を停止して調査を行った結果、QCS を引き出して修理する必要がないことが確認できました。

2026 年の年明けは、損傷したコリメータの交換などの作業を行うとともに、1 月 7 日から順次立ち上げ、1 月 26 日にはメインリング運転を再開、1 月 30 日から衝突運転を開始しました。ビームアボートが起きないように努めながらビーム電流を増やし、ルミノシティを上げてゆく戦いが続いています。安定運転にもビーム電流増強にもさまざまな困難があり、例えば、現在でもまだ原因がわかっておらず防ぐことのできていないタイプの Sudden Beam Loss にも苦しめられています。

Belle II 測定器側では、引き続き Sudden Beam Loss によるピクセル崩壊点検出器 (PXD) の損傷のリスクを避けるために PXD の電源を落として運転を行っています。測定器側での対策として、前兆となる現象の検知方法の研究、前兆を検知してからビーム 1~数ターンの内に PXD の電源をシャットダウン

する機構の開発などを進めています。

2024 年秋の運転では、前方粒子識別検出器 (ARICH) の読み出し回路への冷却水循環に問題があり、ARICH 全体の 1 割程度の読み出し回路の電源を落としてデータ収集運転となりましたが、問題の見つかった継手を使用しない形への配管の修正を行い、2025 年の運転では全面復旧しています。

Belle II 測定器のその他の検出器でもさまざまな改良・改修が加えられています。例えばデータ収集グループでは、データ収集効率を上げるために、エラー発生時に部分的なリセットで復旧する場合には収集システム全体は止めずに再開する機構を開発し、2025 年の運転から運用を開始しました。この機構により、かなりの割合のエラーについて、制御室に常駐するシフト要員が気づく前に、数秒のうちに自動的に復旧してデータ収集を継続できています。また、データ収集を止めて復旧が必要な場合にも、シフト要員がボタンひとつで修復できる機構を用意し、素早い復旧を可能にしています。もちろんこれらの機構は完璧ではないので、各検出器のエキスパートのシフト要員が世界各地からのリモート接続で常に待機しており、必要に応じて復旧を行い、停止時間をできるだけなくするための不断努力を続けています。

ルミノシティの記録も更新しています。3 月 17 日には瞬間ルミノシティが $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に達し、これまでの Belle II オフでの参考記録に並びました。3 月 19 日には $5.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に達し、これが現在の記録です。また、日ごとの積分ルミノシティについても 3 月 13 日に大台の 3 fb^{-1} を越え、3 月 20 日には 3.37 fb^{-1} の過去最高を記録しました。4 月 15 日時点での総データ量はオンラインの暫定値で 745 fb^{-1} です (図 1)。運転は 6 月 30 日までの予定ですが、6 月の運転は気温上昇の影響などによる加速器の状態を見て判断します。

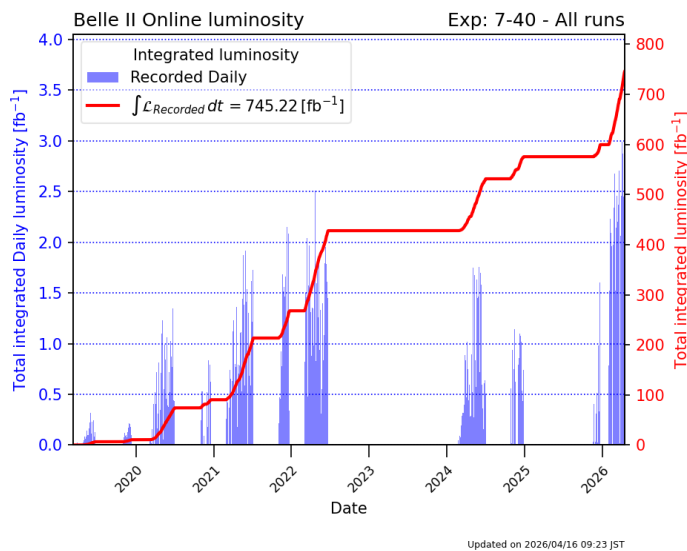


図1 Belle II のこれまでの積分ルミノシティ。

3 Belle II 測定器のアップグレード

Belle 実験で得たデータの 50 倍のデータ量に相当する物理成果を得るという当初の目標を越える成果を目指して、必要とされるルミノシティに到達するために、2032 年からの次の長期シャットダウン (Long Shutdown 2, LS2) を予定しており、LS2 に向けての準備が着々と進められています。1 月 26–28 日の 3 日間、KEK で Belle II 測定器のアップグレードに関するワークショップを行い、アップグレード

の基本路線を策定しました。また、2月10日には、加速器・測定器合同のレビューを行いました。

SuperKEKB では Linac の RF システムのアップグレード、電子リング (HER) の RF システムの増強、より衝突点へ近づけた最終収束電磁石 (QCS) の製作などを行います。特に QCS の外側の形状が Belle II 測定器の最内層の境界条件になるため非常に重要で、この境界条件を決定することができました。

Belle II 測定器では5層からなる新しいピクセル崩壊点検出器 (VTX) の製作 (図2)、新しい中央飛跡検出器 (oDC) の製作、VTX と oDC の間に挿入する飛跡検出および時間測定のための新しい検出器の開発 (FTL、STL) を行うことを基本方針と決定しました (図3)。また、その他にも既存の検出器の読み出し回路のアップグレードなどを行います。

7月に予定されている次のアップグレード・ワークショップで測定器アップグレードの全体像を確定し、その後2027年半ば頃までにテクニカル・デザイン・レポートとしてまとめる作業に入ります。

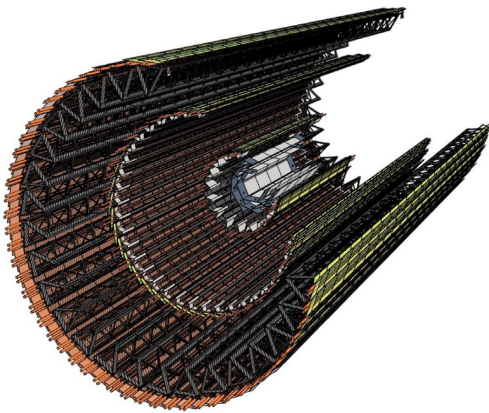


図2 5層からなる新しいピクセル崩壊点検出器 (VTX) の構造。

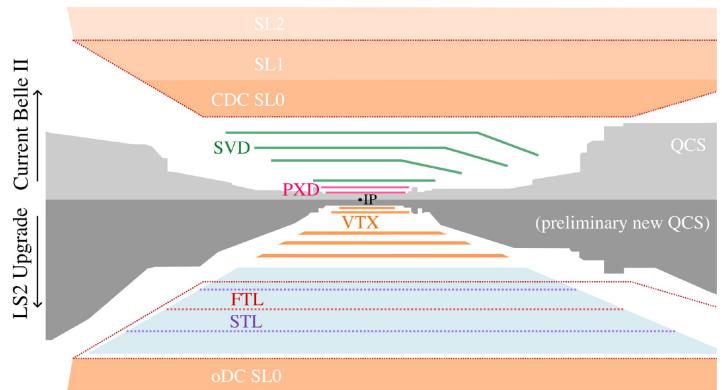


図3 Belle II 測定器の内層部の現在の構成 (上半分) とアップグレード後の基本構成 (下半分)。

4 Belle と Belle II データ解析の状況

Belle II 実験がラン 1 (2019年3月~2022年6月) の期間に収集した積分ルミノシティ 428 fb^{-1} の全データ (そのうち 365 fb^{-1} が 387×10^6 の B 中間子崩壊を含むデータ) の解析が進められており、また Belle 実験のデータを使った解析も引き続き数多く行われています。Belle 実験のデータも Belle II 実験の枠組の中で取り扱うことになり、Belle 実験データの解析結果も Belle II 実験として投稿・出版しています。

最新の成果として、 B 中間子が2つの π^0 中間子に崩壊する過程 ($B \rightarrow \pi^0 \pi^0$) の時間依存 CP 非対称性の測定結果を3月に行われた Moriond EW 2026 会議で発表し、KEK でも素核研セミナーを開催しました。 π^0 は98.8%の分岐比で二つの光子に崩壊するため、 $B \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊点はほとんどの場合測定することができません (分岐比1.2%の $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ 崩壊を使えば測定可能ですが、当面の間、十分な事象数を得ることができません)。このため、この崩壊過程では、2つの B 中間子の崩壊点の差を測定する必要のある時間依存 CP 非対称性の測定は難しいと考えられていました。ところが、 B 中間子対の生成点と $B \rightarrow \pi^0 \pi^0$ ではない方 (タグ側) の B 中間子の崩壊点がわかれば、 B 中間子対の量子もつれから、実際には測定していない $B \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の時間依存 CP 非対称性の情報を得ることができます。SuperKEKB のナノビームにより衝突点が非常に小さいことと、Belle II のピクセル崩壊点検出器 (PXD) により高精度

で測定できるタグ側の B 中間子崩壊点と精度の良い運動量測定から、タグ側の B 中間子の生成点と崩壊点の差を十分な精度で測定することが可能になったため (図 4)、今回世界で初めて $B \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の時間依存 CP 非対称性の測定に成功しました (図 5)。また、この結果を使用して、 $B \rightarrow \pi \pi$ の 3 つの崩壊過程を用いた小林益川ユニタリティ三角形の角度 ϕ_2 の測定精度が向上しました。この結果を論文として報告するため準備中です。

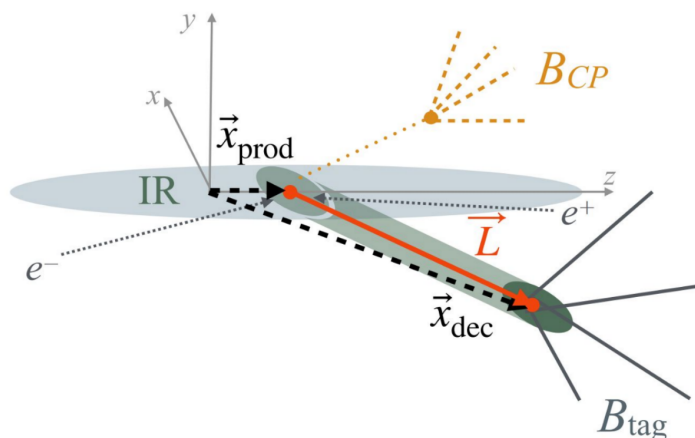


図4 タグ側の B 中間子の生成点と崩壊点の測定の概念図。

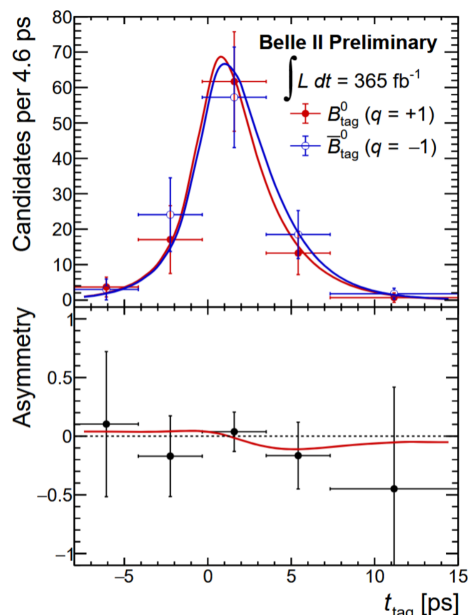


図5 $B \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の時間依存 CP 非対称性の測定結果。

ここ半年間で、Belle II 実験は 16 の新しい結果 (参照 [1]) を論文として投稿しました。研究対象も多岐にわたっており、B 中間子崩壊に関するものが 6 篇、B 中間子そのものに関するものが 1 篇、D 中間子崩壊に関するものが 1 篇、チャームハドロンとチャーモニウム粒子を使った新物理探索が 2 篇、ハドロン物理に関するものが 6 篇となっています。以下にその一部を紹介します。

- 荷電 B 中間子のミューオンとミューニュートリノへの二体崩壊 ($B^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$) は、終状態にハドロンを含まないため、標準理論で分岐比を精度よく計算することができます。ただし、ヘリシティ抑制のため分岐比が非常に小さく、未だ観測されていません。また、対応するタウレプトンへの二体崩壊 ($B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$) と、崩壊過程にレプトンの質量差に起因するもの以外の違いはないとされており、レプトン普遍性の検証を行うことができます。ニュートリノは測定できないものの、ミューオンは B 中間子の静止系で単色の運動量を持ちます。反対側の B 中間子の情報を可能な限り利用するインクルーシブ・タグ手法を用いて、Belle と Belle II の全データを用いて解析したところ、信号は 2.4σ の有意度で、中心値も理論予想と非常に近い値が得られました (図 6、文献 [2])。この崩壊過程の証拠が近い将来得られそうです。

- B 中間子のチャームを含まないインクルーシブな終状態へのセミレプトニック崩壊 $B \rightarrow X_U \ell \nu$ の測定は小林益川行列要素 $|V_{ub}|$ (絶対値) を決定する主要な方法のひとつです。この崩壊では、チャームを含むセミレプトニック崩壊 $B \rightarrow X_c \ell \nu$ が非常に大きな背景事象になるため、これまでは、 X_U 終状態の質量 M_X や運動量移行の二乗 q^2 について、測定に使用する領域を大きく制限する必要がありました。今回の新しい測定では、背景事象のモデルをより正確にすることにより、これらの制限を撤廃し、より精度の良い測定が可能になりました。 $|V_{ub}|$ の結果はこれまでのインクルーシブ測定での世界平均の結果と一致しています (図 7、文献 [3])。
- 反 b クォークが d クォークと結合する B^0 中間子と反 b クォークが u クォークと結合する B^+ 中間子はほぼ同じ質量を持ちますが、厳密にはわずかに異なっています。Belle および Belle II 実験では B 中間子は生成に必要なエネルギーの閾値のすぐ近くで生成されるため、ビームエネルギーのわずかな違いが生成断面積の違いにつながります。しかも、そのエネルギー依存性が B^0 と B^+ とで質量差によりわずかに変わってきます。KEKB と SuperKEKB の長い運転期間の中でビームエネルギーは必ずしも一定ではなかったため、異なるエネルギーごとのデータを使うことでエネルギー依存性を求めて、これまででない精度で B^0 と B^+ の質量差 $m(B^0) - m(B^+) = (0.495 \pm 0.024 \pm 0.005) \text{ MeV}/c^2$ を求めました。また、今回求めた生成断面積のエネルギー依存性は、Belle 実験で見つかった $Z_b(10610)$ や $Z_b(10650)$ などの新粒子の正体の解明にも役立ちます (図 8、文献 [4])。

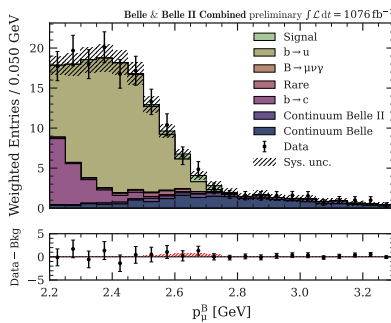


図6 $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ の探索結果。信号の候補は 2.6 GeV 付近に単色の運動量を持ち、背景事象からの超過として現れる。

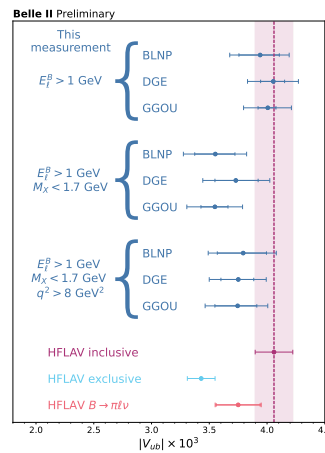


図7 $|V_{ub}|$ の測定値とこれまでの世界平均 (HFLAV) との比較。測定値は、使用する理論モデル (BLNP, DGE, GGOU) や、 M_X や q^2 の制限に依存する。

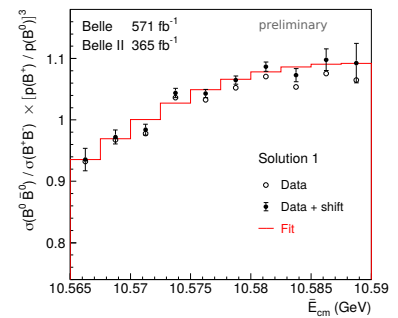


図8 $B^0 \bar{B}^0$ と $B^+ B^-$ の生成断面積のエネルギー依存性の比。

ラン 1 のデータの解析もまだまだ引き続き行われていますが、2024 年 1 月以降のラン 2 のデータ解析の準備も現在進めており、現在投稿準備中の結果の中にはラン 2 のデータも使用したものが含まれています。現在の運転のデータを加えると Belle II 実験の B 中間子崩壊のデータ量が Belle 実験を越える予定であり、Belle で行われたすべての結果をより良い精度で更新することが原理的に可能になると期待できます。

5 参考資料

- [1] Belle II 投稿論文一覧: <https://www.belle2.org/research/physics/publications>
- [2] Belle II Collaboration, arxiv:2602.09800 (Phys. Rev. D に投稿中)
- [3] Belle II Collaboration, Phys Rev D 113, 032004 (2026)
- [4] Belle II Collaboration, arxiv:2511.15926 (JHEP に投稿中)