

1 Belle II 2024 秋のビーム運転終了!

1月29日から始まった2024年の運転の7月1日までの前半戦では、瞬時にビームを失う現象 (sudden beam loss, SBL) に悩まされ、ピクセル型シリコン崩壊点検出器 (PXD) に大きな損傷を生じさせてしまったため PXD の電源を落としての運転を余儀無くされ、また最高ルミノシティ更新をすることも叶わなかったが、SBL 解決の手掛りになる現象をいろいろと観測することができた。例えば、上部に電極のついたビームパイプ付近の真空悪化を伴う SBL が多く、このケースでは電極からのダスト落下が SBL の原因ではないかと考えられた。そこで、夏のシャットダウン期間中には、電極からのダスト落下を抑制するため、これらのビームパイプの一部を上下反転させるなどの大掛かりな改修作業を行い、加速器・測定器のさまざまな対策を講じた上で秋のビーム運転再開に備えた。

Belle II・SuperKEKB のメンバーがさまざまなレベルで議論を重ねた結果、秋のビーム運転ではルミノシティ向上を最優先課題として、12月27日までの運転期間中に、少数バンチ運転で得られたバンチあたりのルミノシティ (スペシフィック・ルミノシティ) から算定することのできる全バンチ運転での最大ルミノシティを目標とした。この目標を達成するには、ビーム電流増強および、電流増強に伴うエミッタンス増大 (集束したビームの肥大) の克服が重要な鍵となる。

秋のビーム運転は10月8日から加速器の真空焼き出し運転を開始し、予定通り焼き出し運転での目標の電流値に到達することができた。ビーム衝突およびデータ収集運転ができる準備が整い、10月25日未明から Belle II でのデータ収集運転を開始した。この運転期間では、電子ビーム (High Energy Ring, HER) のエミッタンスが衝突時以外でも大幅に増大してしまっていることや、陽電子ビーム (Low Energy Ring, LER) 起因の Belle II 測定器へのバックグラウンドが2024年前半と比べて数倍も高いなどの問題に直面した。また、なかなかルミノシティを上げることができなかった。さらに、SBL の頻度が前期よりも増えてしまっていた。

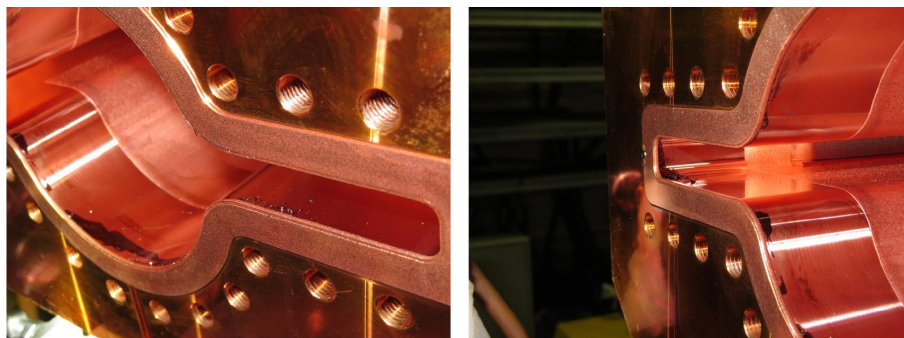


図 1: ベローズチェンバーで発見された黒いしみ

SBL の回数が増えるとともに、ある特定の場所での真空悪化を伴う SBL が突出していることが明らかになった。複数の疑わしき箇所でのベローズチェンバーを調べたところ、いずれも図 1 のように内部に黒いしみのようなものが付着しており、真空を保持するために接続部に塗布された真空シール剤が漏れ出して変色したもののようであった。ベローズチェンバーを交換または変色した真空シール剤を取り除いたところ、該当箇所での真空悪化を伴う SBL を大幅に削減することができた。真空シール剤は非常に多くの場所で使用されており、すべて取り除く

ことは難しいが、今後できるだけ対策をしてゆく。一方、真空シール剤の影響が大きいこともあり、SBL抑制を期待してビームパイプを反転させた効果は今のところまだはっきり見えていない。

エミッタンス増大の克服はなかなか進まなかったが、物理データ収集は夜間・休日のみ行うことで平日昼間と夕方は加速器のスタディを最優先とした。運転期間の最終盤では電流を上げるにつれ Belle II 測定器へのバックグラウンドが非常に増大したため「ルミノシティ・チャレンジ」と銘打ってデータ収集を止めて電流増強および加速器パラメータの調整を進めルミノシティの向上を狙って運転を行った。その甲斐もあり、最終日の2日前に最高ルミノシティを更新することができた。その後もチャレンジを続け、最終日12月27日の終了直前、深夜1時40分には $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録し、これが今期の最高ルミノシティとして、現在のルミノシティの世界記録（データ収集を止めているため参考値）となっている（図2左）。

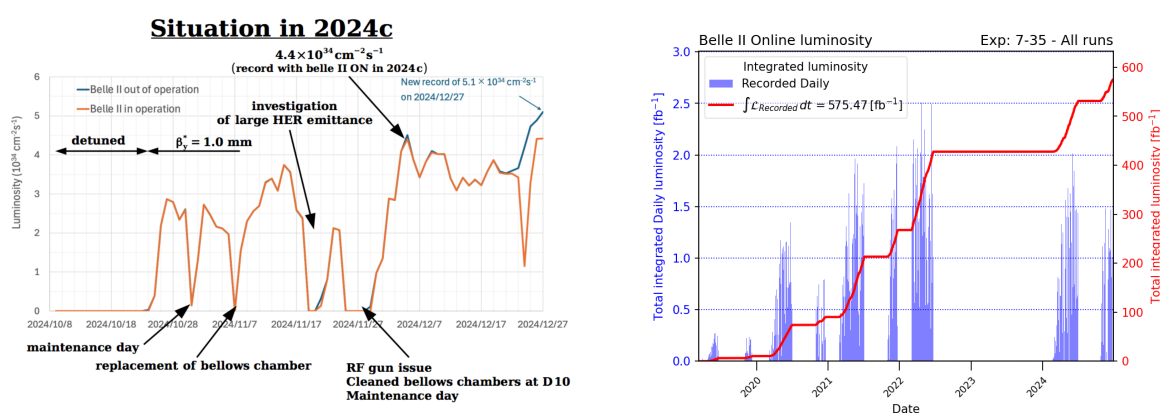


図 2: (左) 2024 年秋のビーム運転でのルミノシティの変遷、(右) 2024 年 12 月 27 日時点における、これまでの日毎の積分ルミノシティと総積分ルミノシティの変遷。

Belle II 測定器にも夏のシャットダウン中に数多くの細かい改良がなされた。PXD の電源は落としたままの運転ではあったが、それ以外の検出器は順調にデータ収集運転を進める予定であった。ところが、秋の運転開始前から、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、徐々に流量が低下していった。その結果、ARICH 全体の 1/6 の読み出し回路の電源を落としてデータ収集運転を開始することになった。その後読み出し回路の温度上昇を監視しながら電源を供給できる読み出し回路を増やしつつ運転を継続したが、今度は別の冷却水循環経路でも流量低下により読み出し回路の温度が上限を越えてしまったため、さらに電源を供給できない読み出し回路が増えてしまった。この問題により、ARICH を通過する粒子 (B 中間子崩壊からの粒子の場合、全運動量領域で全体の 7%、0.5 GeV/c 以上だと 13%) に対して 5–10% の粒子識別効率の低下が見込まれている。現在のシャットダウン中にこの問題を解決させる予定である。

全体的には、特にデータ収集効率を向上させるための数多くの取り組みを行った。バックグラウンドが高いことによる読み出し回路の誤動作でデータ収集が停止する事象が頻発したが、さまざまな停止理由を取りまとめてシフト要員に一元的に報告し、自動的にあるいはボタンひとつで復旧する仕組みがほとんどの場合に正しく動作したため、データ収集復旧による時間のロスを以前よりも抑えることができた。また、入射に同期して発生するバックグラウンドトリガを除去する時間の長さを動的に調整する機能もうまく動作し、データ収集時間のロスの削減に貢献した。加速器スタディや調整を優先し、加速器機器の老朽化などによるトラブルも

あったため、運転時間に占めるデータ収集の時間は全体の36%にとどまった。このデータ収集時間のうち約6%を測定器のトラブル、5%を入射バックグラウンド除去が占め、全体では85%の効率でデータ収集を行うことができた。目標効率は90%であり、今後もさらなる改良を進めてゆく。秋のビーム運転では 44 fb^{-1} のデータを追加し、Belle IIの総データは速報値で 575 fb^{-1} となった(図2右)。

2 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)の期間に収集した総積分ルミノシティ 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)¹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る。Belle実験のデータもBelle II実験の枠組の中で取り扱ってゆくことになったこともあり、Belle実験のデータ解析結果もBelle II実験として出版されるようになってきた。

ここ半年間で、Belle II実験としては14の新しい結果(参照(1))を、またBelle実験としては5つの新しい結果(参照(2))を論文として投稿した。以下にその一部を紹介する。

- B中間子の $J/\psi K_S^0$ への崩壊はBelle実験によるB中間子のCP対称性の破れの発見および小林益川理論の検証に使われたものである。この崩壊で測定されるCP対称性の破れは、ほぼユニタリティー三角形の角度 ϕ_1 で表わすことができ、 ϕ_1 をはじめとするユニタリティー三角形の三辺の大きさと三つの角度を精度よく測定することは、小林益川理論のさらなる検証および標準理論を超える物理の探索につながる。標準理論の枠組の中でも、同じ $J/\psi K_S^0$ 終状態を生成するループダイアグラムと呼ばれる素過程により ϕ_1 からのずれが生じ、その大きさは現在の世界平均値の実験誤差と同程度であると見積もられている。このずれは、似たような崩壊過程であるB中間子の $J/\psi \pi^0$ や $J/\psi \omega$ への崩壊を用いて実験的に調べることができる。今回、前者についてCP対称性の破れを初観測し(図3、文献(3))、後者についても崩壊過程を初観測した(文献(4))。
- ユニタリティー三角形の角度 ϕ_2 はB中間子の $\pi\pi$ や $\rho\rho$ へのすべての電荷の組み合わせの崩壊過程の分岐比とCP非対称性の測定から求めることができる。特に $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ と $B^0 \rightarrow \rho^+\rho^-$ (ρ^+ と ρ^- はそれぞれ $\pi^+\pi^0$ と $\pi^-\pi^0$ に崩壊)の測定は複数の中性 π 中間子を含み、現在はBelle II実験でしか測定することができない。今回、前者の分岐比と直接CP非対称性(文献(5))、後者の分岐比、偏極度および時間依存CP非対称性(文献(6))を測定することにより ϕ_2 の精度を向上させた(図4)。
- B中間子の崩壊の終状態に光子を含むものは高次効果であるループダイアグラムで生成され、そこに標準理論を超える新物理の寄与が可能である。分岐比、アイソスピン対称性、直接CP対称性、時間依存CP対称性などの測定量があり、それぞれに対して異なる新物理の寄与が考えられる。また終状態にストレンジクォークを含まない終状態($\rho\gamma$ など)は、含む終状態($K^*\gamma$ など)に比べて強く抑制されているため、新粒子の寄与がより有意に見える可能性がある。今回B中間子の $K^*\gamma$ 終状態への崩壊(文献(7))、 $\rho\gamma$ 終

¹積分ルミノシティの再評価により 424 fb^{-1} (全データ)/ 362 fb^{-1} (B中間子データ)の値から改訂。改訂前の値を使用している出版済みの論文でも、差は計上している誤差の範囲内である。

状態への崩壊 (文献 (8))、 $K_S^0 \pi^0 \gamma$ 終状態への崩壊における時間依存 CP 非対称性の測定 (図 5、文献 (9)) を行った。時間依存 CP 非対称性は標準理論では強く抑制されており、有意な CP 非対称性は新物理の証拠となりうる。今回の測定では統計が十分とは言えず、今後の Belle II のデータ蓄積に期待がかかる。

これらの他にも Belle II ではさまざまな B 、 B_s 、 D 、 D_s 中間子崩壊、タウレプトンのフレーバーとバリオン数非保存崩壊の探索、チャームバリオンの研究などに関する論文を投稿している。2024 年 1 月に開始したラン 2 のデータ解析の準備を進めているが、ラン 1 のデータの解析もまだまだ引き続き行われており、国際会議での報告、論文の投稿の準備が進められている。

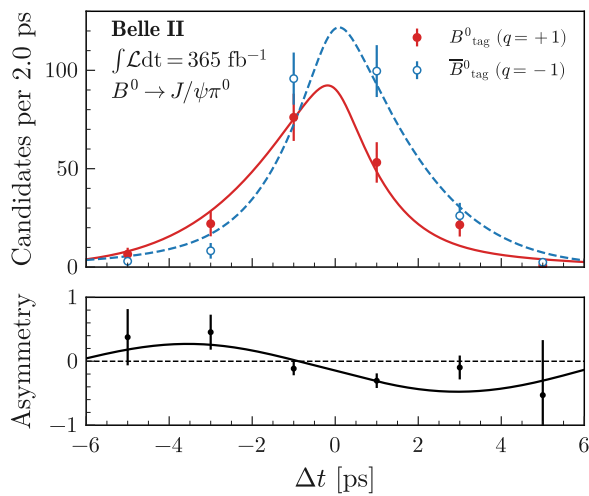


図 3: Belle II での $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^0$ 崩壊時間分布。反対側の B 中間子が B^0 の場合 (赤) と \bar{B}^0 の場合 (青) とで分布が異なる (CP 対称性が破れている)。

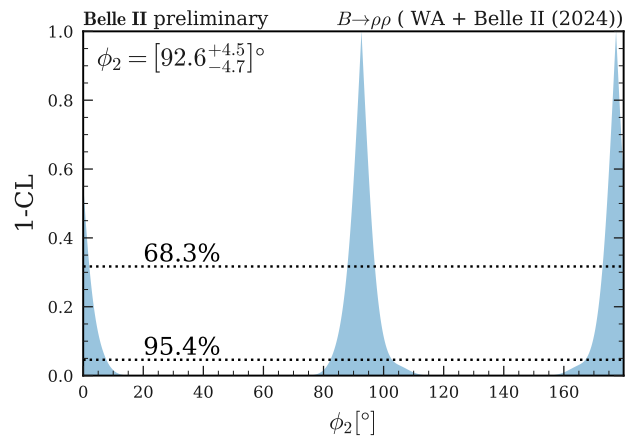


図 4: Belle II で今回測定した $\rho^+ \rho^-$ とこれまでのさまざまな測定を組み合わせ求めた ϕ_2 の値の確率分布。2つの解があるが、 0° に近い解は他の測定から排除される。

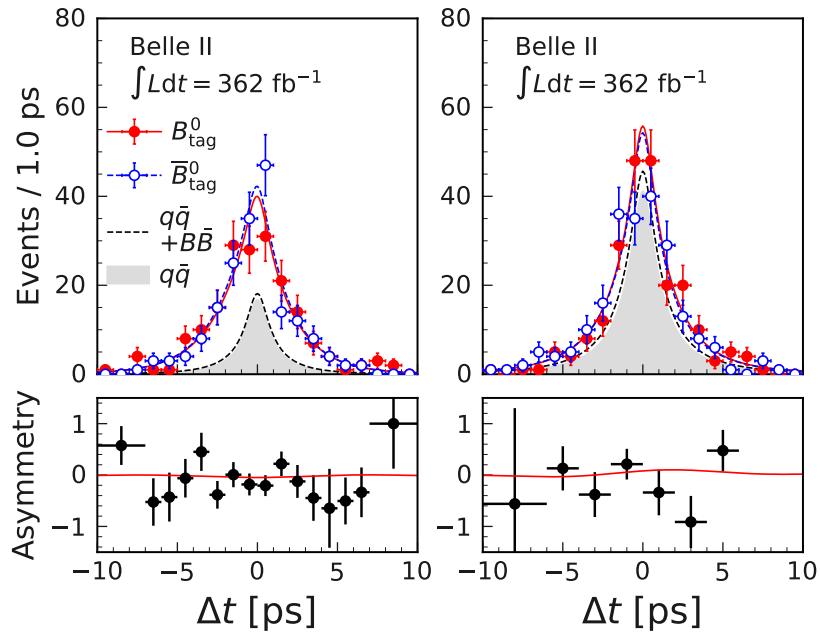


図 5: Belle II での $B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \gamma$ 崩壊時間分布 (左が K^* 質量領域、右がそれ以外)。反対側の B 中間子が B^0 の場合 (赤) と \bar{B}^0 の場合 (青) とで分布に有意な差はない (CP 対称性の破れは見えない)。

3 参考資料

- (1) Belle II 投稿論文一覧: <https://www.belle2.org/research/physics/publications>
- (2) Belle 投稿論文一覧: https://belle.kek.jp/bdocs/b_journal.html
- (3) Belle II Collaboration, Phys. Rev. D 111, 012011 (2025)
- (4) Belle II Collaboration, arxiv:2412.12338 (Phys. Rev. D に掲載予定)
- (5) Belle II Collaboration, arxiv:2412.14260 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (6) Belle II Collaboration, arxiv:2412.19624 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (7) Belle II Collaboration, arxiv:2411.10127 (JHEP に投稿中)
- (8) Belle II Collaboration, arxiv:2407.08984 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (9) Belle II Collaboration, Phys. Rev. Lett. 134, 011802 (2024)