1 新組織体制

SuperKEKB 加速器における Belle II 実験は、ひとつの加速器に対してひとつの実験であり、両方合わせてはじめてスーパー B ファクトリープロジェクトが成立します。これまで、KEK 内では、SuperKEKB 加速器を担う加速器研究施設第 3、4、5 系と、国際共同実験 Belle II コラボレーションをホストする素核研の両輪で、強力にプロジェクトを推進してきました。SuperKEKB 加速器と Belle II 実験の連携は、主に MDI (Machine Detector Interface) グループが担いました。今後さらにプロジェクト内の連携を強化し、プロジェクトのメンバーが一丸となって、ルミノシティ向上と目標とする物理成果の創出に取り組むため、5 月 1 日から図 1 のような体制になりました。素核研 Belle グループのメンバーも、プロジェクトメンバーの一員として、ルミノシティ向上に向けて現在問題となっているさまざまな加速器の課題にも取り組んでいます。

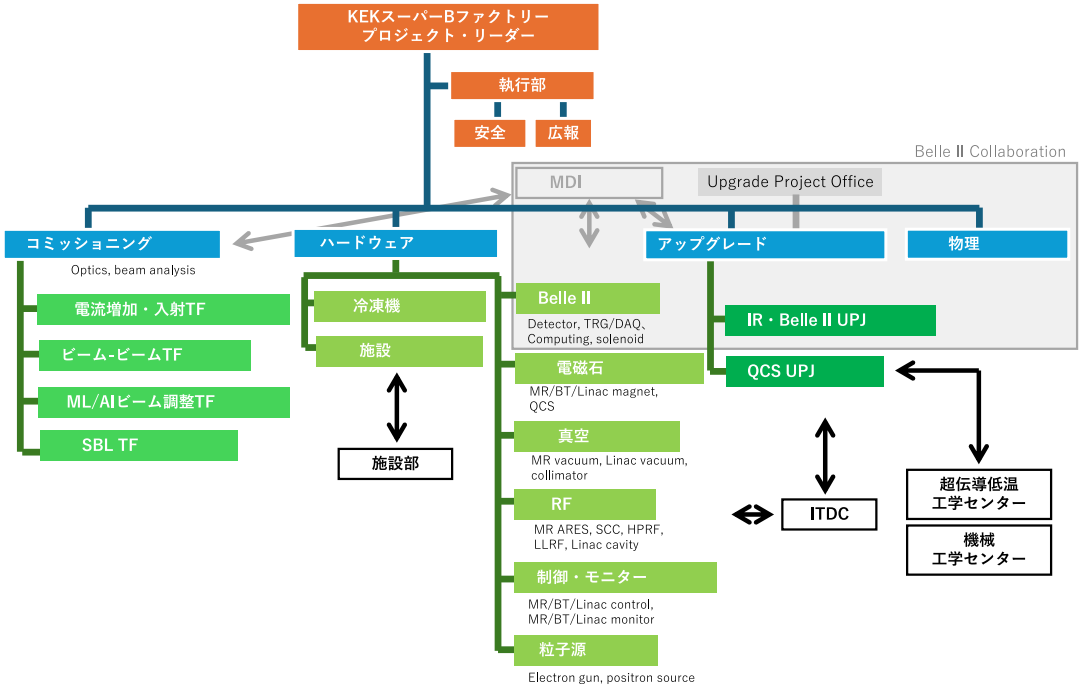


図1 SuperKEKB/Belle II の新体制の組織図。

2 世界最大のデータセット蓄積!

6 月 5 日の機構プレスリリースですでにお伝えしているように、Belle II 実験が蓄積してきた電子・陽電子衝突における $\Upsilon(4S)$ のデータ量が 5 月 17 日に Belle 実験のものを上回り、世界最大になりました。$\Upsilon(4S)$ は $b\bar{b}$ の共鳴状態で、B 中間子対を効率よく生成します。これまでの記録は、Belle 実験が蓄積した 772M 事象、711 fb^{-1} でした。

2025 年 11 月から 2026 年 6 月までの運転期間の間は、積分ルミノシティの最大化を最優先の課題としました。そのためには、(1) 衝突データ収集のための運転時間の確保、(2) 瞬間ルミノシティの向上、(3)

アボートの少ない安定した運転、(4) 高い瞬間ルミノシティの維持、および (5) データ収集効率の向上のすべてが必要となります。これらの中には相反する条件もありますが、以下のように進めてきました。

(1) 運転時間については、蓄積ビーム電流を上げることで瞬間ルミノシティを向上させつつ、運転時間を可能な限り衝突運転による物理データの収集に充てました。瞬間ルミノシティ向上のためには、さらに電流・バンチパターンをはじめとする加速器運転のパラメータ空間での基礎データを収集して、さまざまなアイデアを元に試行錯誤を繰り返す必要があるのですが、今期はほとんどの期間で衝突運転を行いながら実行可能なものに限りました。加速器の立ち上げ、調整、予定されている保守作業、予期せぬ障害対応などの時間を除き、約 70% の時間を物理データ収集に充てることができました。

(2) 瞬間ルミノシティ向上に直結する縦方向衝突点ベータ関数 β_y^* の値を 4 月末から、それまでの 1.0 mm から 0.9 mm にして運転を行いました。単位ビーム電流あたりのルミノシティの値は期待通り約 10% 上昇し、安定して運転を行うことができました。また、運転期間終盤に瞬間ルミノシティの記録更新を含めたさまざまな加速器スタディの項目を用意していましたが、6 月 19 日の雷によると思われる停電により加速器・測定器全体が停止し、データ収集再開まで 4 日程かかった上に運転調整に時間を取られてしまいました。それでも、運転期間の最後には瞬間ルミノティの記録を再度更新することができました。

(3) 長期停止期間 (long shutdown 1, LS1) の後の、2024 年 1 月から始まったラン 2 では瞬時にビームを失う現象 (Sudden Beam Loss、SBL) が頻発するようになってしまいましたが、2025 年の運転中にその主要な原因が陽電子リング (LER) のビームパイプ内に漏れ込んだ真空シール剤であることを突き止め、その後のシャットダウン時に LER の真空シール剤を可能な限り除去しました。その結果、1.4A 以上蓄積している時の LER のアボート回数が 2024 年時に比べて 1/20 以下に激減しました。ただ、まだメカニズムのわかっていない SBL は起きており、特に電子リング (HER) について顕著です。そのため、SBL で一部損傷したピクセル検出器 (PXD) を、引き続きオフのままで運転を継続しました。PXD を使えるようにするためには SBL の兆候を見つけ、不安定になり軌道を外れたビームの一部が運転している PXD に当たる前に素早く PXD の電源を落とす仕組みが必要です。現在、兆候を効率良く検出する方法の研究を進めており、また、素早く電源を落とす仕組みの開発・試験も続けられています。

(4) アボート回数が減り、運転が安定することは、高い瞬間ルミノシティの維持と、積分ルミノシティの向上にも役立ちました。一日あたりの積分ルミノシティとしては 3.5 fb^{-1} の記録が得られているだけでなく、定常的に一日あたり 3 fb^{-1} を超える積分ルミノシティを蓄積できるようになりました。図 2 のように、Belle 実験と比べても、またこれまでの Belle II 実験と比べてもより急速にデータを蓄積できるようになっていることがわかります。

(5) データ収集効率も向上の努力も続いています。図 3 のように、データ収集時の不感時間の最大要因はビーム入射時のバックグラウンドを避けるためにトリガを遮断 (injection veto) している時間になります。入射時のバックグラウンドの状況により遮断時間を動的に調整しており、不感時間の最小化を試みていますが、この成分を本質的に減らす方法は入射によるバックグラウンドを

減らすことに尽きます。そのため、タスクフォースで対策を検討しています。次に大きな成分であった TOP(time-of-projection) 検出器の不感時間は、データ転送量を減らすために検出器内部の FPGA で行っていた信号処理が原因でした。この信号処理を後段で行うようにデータ処理方式を改修して、5 月始めに解決しました。他にも、放射線による Single Event Upset(SEU) によるデータ収集停止を自動回復する仕組みなどを導入し、放射線およびバックグラウンドが増加した環境化で約 87% のデータ収集効率をキープしました。

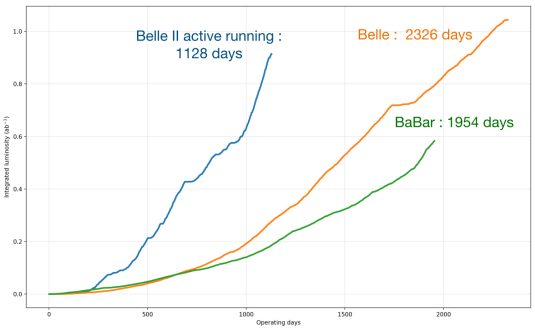


図2　Belle II、Belle、BaBar 実験の積分ルミノシティ蓄積の推移の比較。

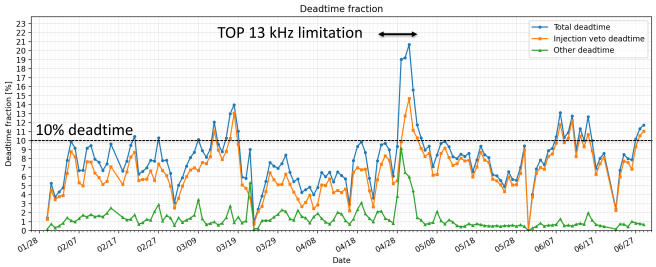


図3　データ収集の不感時間の割合の推移。

これらの努力が組み合わさって、6 月末の運転終了時には積分ルミノシティがオンラインの暫定値で 914 fb^{-1} となり、$\Upsilon(4S)$ でのデータも 800 fb^{-1} を超えました。Belle 実験を超える B 中間子のデータの解析がすでに始まっています。これまでも測定器性能及び解析手法の向上により Belle 実験より精度の良い解析結果を多数報告してきましたが、現在の全データを使えば、Belle 実験の B 中間子のすべての結果を塗りかえることが可能になります。

3　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) に加え、ラン 2 (2024 年 1 月〜) のデータを含めた解析が始まっており、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。

ここ半年間で、Belle II 実験は 11 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 5 篇、ハドロン物理に関するものが 3 篇、τ レプトン崩壊に関するものが 1 篇、ダークセクターに関するものが 1 篇、それに Belle II では物理の論文として計上している解析手法の性能に関するものが 1 篇です。これらのうち、以下に、KEK をはじめとする日本グループの主導した論文 4 篇を紹介します。

- B 中間子の D または D^* 中間子、τ レプトン、ニュートリノへのセミレプトニック 3 体崩壊 ($B \to D^{(*)}\tau\nu$) は、レプトン普遍性が成り立つ標準模型では、$B \to D^{(*)}\ell\nu$ (ℓ は電子またはミューオン) と同じ相互作用で、分岐比の違いはレプトンの質量の差によるものだけです。この τ

モードへの分岐比と他のレプトンモードへの分岐比の比 ($R(D)$ および $R(D^*)$、あるいはまとめて $R(D^{(*)})$ が標準模型からずれていることが 2012 年に BaBar 実験より報告されて以来、Belle、Belle II、LHCb 実験でさまざまな手法で測定が報告されてきましたが、全体的に標準模型から同じ方向へずれている傾向があり、標準模型を超える物理の可能性が議論され続けています。今回の測定は Belle II でハドロニックタグ手法および τ のレプトニック崩壊を用いたラン 1 全データの解析です。この手法でのこれまでで最も精度の良い測定となっており、標準模型とは 1.5σ の差、世界平均とは 1.3σ の差で一致する結果になりました (図 4、文献 [2])。

- 標準模型の崩壊過程ではレプトンのフレーバーは必ず保存しますが、その前提条件を外した新物理模型では τ レプトンのレプトンフレーバーを保存しないさまざまな崩壊モードを考えることができます。もしそのような崩壊が発見されれば新物理の決定的な証拠となります。その主要探索モードのひとつである τ レプトンのミューオンと光子への崩壊の探索を行いました。機械学習手法である Gradient Boosted Decision Tree (GBDT) を用いて、解析をかなり改善することができました。Belle 実験の半分以下のデータで、Belle 実験の上限値を更新することはできませんでしたが、Belle の時と比べて信号検出効率、背景事象抑制効率ともに大幅に向上しました (図 5、文献 [3])。
- Belle の $\Upsilon(1S)$ および $\Upsilon(2S)$ 共鳴のデータを用いて、$\Xi^0 p$、$\Omega^- p$、および $\Omega^- n$ か成るエキゾチックな 6 クォーク状態 (ダイバリオン) の探索を行いました。束縛状態の場合と非束縛状態の場合の両方を考えて、非束縛状態 (Q 値が正) の場合にはこれらのバリオンがそのまま終状態に現れますが、束縛状態 (Q 値が負) の場合にはより軽い終状態である $\pi^0\Lambda p$、$\Xi^0\Lambda$ ($\Xi^0 \to \pi^0\Lambda$)、および $\Xi^-\Lambda$ ($\Xi^- \to \pi^-\Lambda$) になります。これらのエキゾチック状態の信号は見つかりませんでしたが、このように Belle や Belle II のデータを用いたさまざまなハドロン物理の研究が行われています。(図 6、文献 [4])。
- Belle II では、解析手法のさまざまな側面が改良され続けています。レプトン同定の手法もそのひとつで、レプトン同定効率の向上は、そのまま物理成果の精度向上につながります。現在のところ、電子識別では Boosted Decision Tree(BDT) で効率が大きく向上するものの、ミューオンではまだ単純な手法の方が良い結果を得られています (図 7)。また、シミュレーションとデータとの検出効率の乖離を補正するため、補正のための詳細なテーブルを用意します (文献 [5])。

Belle II の投稿論文数は総計で 100 篇を超え、最新のものは 110 篇目になります。また、出版論文数も、出版予定のものを含めると、ちょうど 100 篇に達しました。現在、出版準備中のものが多数ありますが、今後は、さらに早いペースで物理結果を生み出してゆくことができると期待できます。

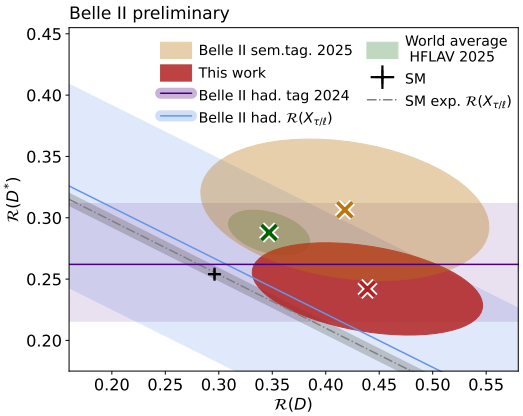


図4　$R(D)$ と $R(D^*)$ の測定結果と、これまでの Belle II の結果、世界平均および標準模型との比較。

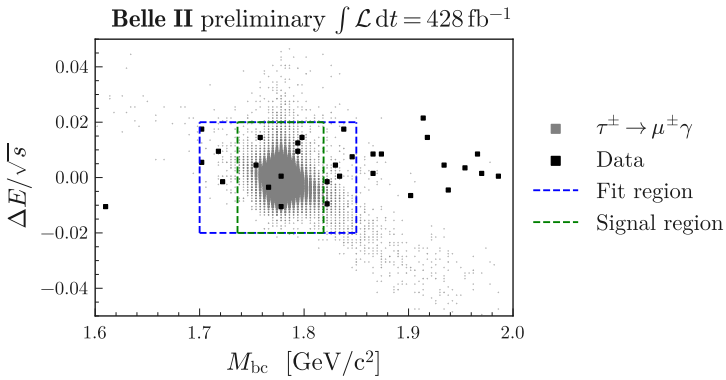


図5　$\tau \to \mu\gamma$ の探索結果。信号領域に残った事象は背景事象と無矛盾。

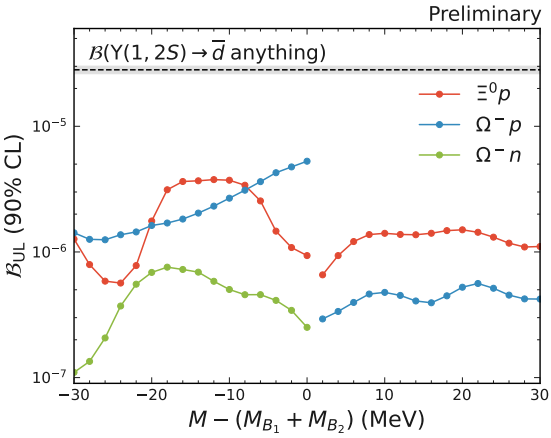


図6　ダイバリオン探索の結果。$\Upsilon(1,2S)$ からの重陽子生成の分岐比に比べ 1–2 桁低い分岐比の上限値を得た。

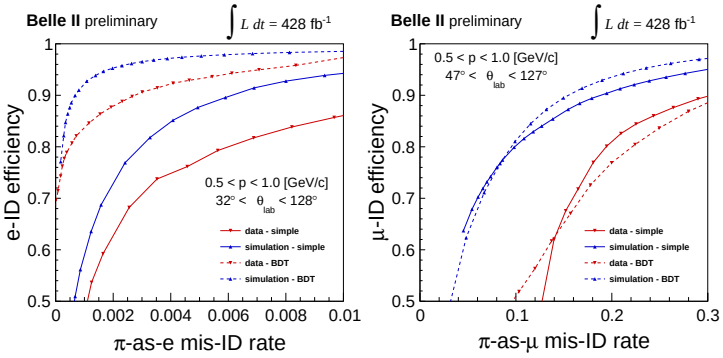


図7　電子 (左)・ミューオン (右) のシミュレーションとデータにおける識別性能について、BDT および単純な手法による効率と誤識別の関係。

4　その他

Belle II 実験では、2032 年度に計画している次の長期改修作業 (long shutdown 2, LS2) へ向けて、KEK を中心としてビームパイプを含む衝突点近傍や、次期中央飛跡検出器 (oDC) などの設計が進められており、Belle II コラボレーションとしても次期崩壊点検出器 (VTX) などの開発が進められています。10 月 14–16 日には KEK でアップグレードワークショップを開催し、さらに 10 月 19–23 日の Belle II General Meeting (B2GM) でも引き続き議論が行われる予定です。

Belle II の牽引するフレーバー物理に関してもさまざまなアクティビティがあります。9 月 2–4 日にはフレーバーフロンティア 2026 ワークショップを理論コミュニティと合同で岩手大学で開催しました。11 月 17–20 日には毎年恒例のフレーバー物理ワークショップを富山市で開催します。

夏の間はさまざまなアウトリーチ・教育活動の期間でもありました。Belle グループでは、総研大・KEK Summer Student Program (KEKSSP) の枠組で 4 か国から 4 名の学生を受け入れました。また、毎年恒例の高校生のための素粒子サイエンスキャンプ Belle Plus 2026 に加え、高専生のためのチェンバー実習、中学生の職場体験、技術職員向けのインターンなどを行いました。次世代の研究者の誕生に少しでも貢献できたらと考えております。

5　参考資料

[1] Belle II 投稿論文一覧: `https://docs.belle2.org/pub_data/publications/`
(前回と比べ URL および形式が変更されています)
[2] Belle II Collaboration, arxiv:2602.09800 (Phys. Rev. Lett. に投稿中)
[3] Belle II Collaboration, arxiv:2608.23009 (JHEP に投稿中)
[4] Belle II Collaboration, arxiv:2605.29778 (Phys. Rev. Lett. に投稿中)
[5] Belle II Collaboration, arxiv:2606.26274 (Euro. Phys. J. C に投稿中)