

1 Belle II 長期運転停止期間中の作業のまとめ

2022 年 6 月のビーム運転終了から始まった SuperKEKB/Belle II の長期運転停止期間 (LS1) では、LS1 後のさらなるルミノシティ増強に向けて加速器と測定器の改良・改修作業を進めてきた。LS1 の作業はほぼすべて完了し、間もなく加速器の運転を再開する予定である。以下に、2023 年夏ごろからの LS1 の最終段階で行った Belle II 測定器に関する主な作業について説明する。

崩壊点位置検出器 (VXD) は 2 層からなるピクセル型シリコン検出器 (PXD) と 4 層からなるストリップ型シリコン検出器 (SVD) とで構成される。LS1 では、未実装部があった PXD を全てのセンサーを実装したものに交換し、衝突点ビームパイプを PXD に到達する放射光を抑制するために改良した新型に交換した。

Belle II 測定器から取り出された VXD から取り外された SVD と、ドイツ DESY 研究所で組み立てられ、KEK に運ばれてきた新しい PXD とを組み上げて新しい VXD が完成した (図 1 左)。完成後の試験で、PXD のグラウンドがビームパイプと意図せず接触していることが判明したが、大きな問題とはならないことを確認した。

7 月 28 日には、新しい VXD の Belle II 測定器へのインストール作業を行った (図 1 右)。インストールした VXD 内の PXD および SVD の全モジュールが動作することを確認できたが、9 月後半に行った宇宙線を使用した性能評価の結果、検出器の熱変形を吸収するための摺動機構の不具合が完全には修正しきれておらず、電源を投入すると、20 あるラダーのうち、2 つのラダーで 1mm 程度の変形が生じることが判明した。DESY での試験結果から 1mm の変形は許容範囲内と考えられるが、今後、当該 2 ラダーを構成する 4 モジュールの一部を使用しない可能性も含めて運転方法を慎重に検討してゆく。

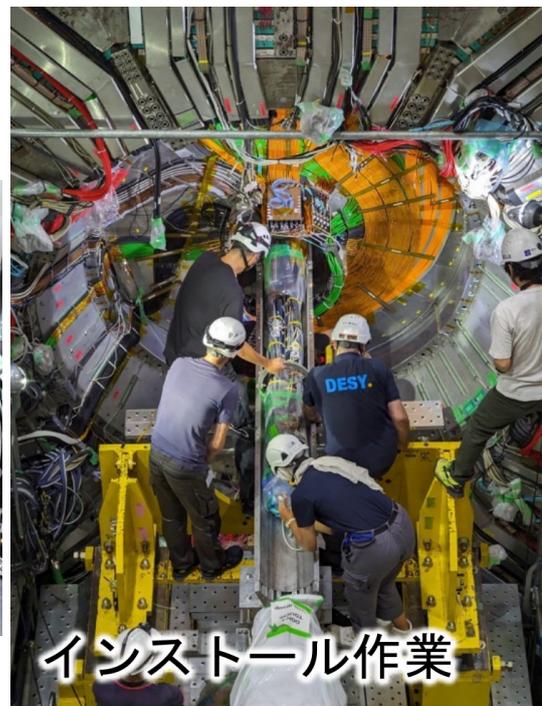


図 1: (左) 新しい VXD の組み立て作業、(右) VXD の Belle II 測定器へのインストール作業の様子。

運転再開に向けた次の作業である最終収束四重極電磁石 (QCS) の挿入作業では大きな問題が発覚した。QCS は SuperKEKB 加速器の一部であり、Belle II 測定器の内部の手の届かない場所で PXD の内側にある衝突点ビームパイプと、真空洩れがないように接続する必要がある。この接続のためにロッドと歯車を使用した遠隔真空接続 (RVC) という機構を用いる。10月4日に測定器前方側での QCS の挿入作業を開始したところ、RVC と VXD の間の隙間の余りが足りず、RVC と VXD のケーブルを押えるケージとが干渉することが判明した。原因は、ケージの固定に誤った長さのスペーサーの使用されたことと、新しい VXD になり増加したケーブルによりケージが変形したことにあった。検証の結果、RVC の歯車の不要部分を切り欠き、ケージの干渉部分も切り欠くことにより挿入作業を完了することができることがわかった (図 2 左)。急遽 DESY に保管していた予備の RVC の歯車の加工を行い、飛行機で KEK へ運び込んで交換作業を行い、KEK 工作センターの尽力によりケージの加工も行い、10月23日に再挑戦した挿入作業は無事に完了した。後方 QCS の挿入作業ではこの問題は起きなかった。

VXD 以外の検出器についても、LS1 での飛跡検出器 (CDC)、中央粒子識別装置 (TOP)、 K_L /ミュオン検出器 (KLM) などの改修作業が完了し、宇宙線データなどを用いた検証作業を行った。データ収集システム (DAQ) は、データ読み出しシステムを Belle 実験の時代から使用してきた COPPER と呼ばれるシステムから LS1 前に部分的に使用を開始していた PCIe40 と呼ばれるシステムに全面交換を行った。また、データ監視機構の改修など、さまざまな改良作業を行い、運転開始に向けての調整を行っている。

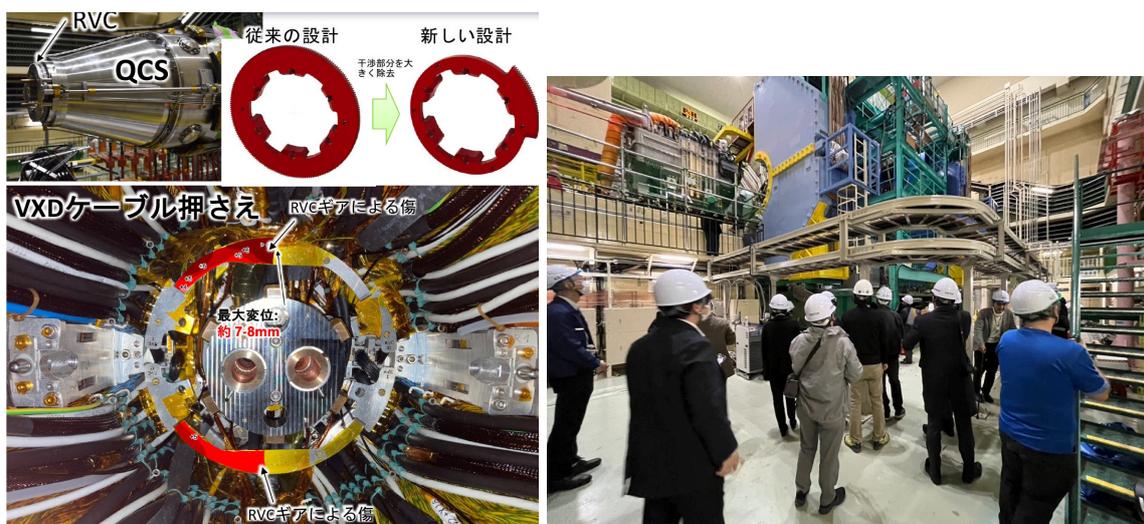


図 2: (左) RVC の改修作業、(右) エンドヨークを閉じる作業の様子。

その後、10月26日に前後方電磁カロリメータ (ECL) と前方粒子識別装置 (ARICH) を内包したエンドキャップ部を挿入し、ECL と ARICH の動作確認の後、12月18日に前方 KLM 検出器を内包したエンドヨークを閉じ、2024年1月12日に放射線遮蔽のためのコンクリート遮蔽体の設置が完了した。12月18日には報道関係者を招いてエンドヨークを閉じる作業 (図 2 右) に参加していただくとともにプレスサロンを開催した。今後、1月29日に SuperKEKB メインリングへのビーム入射を開始し、LS1 明けの新しい Run 2 の開始となる予定である。

2 Belle II データ解析の状況

Belle II 実験が LS1 までに収集した総積分ルミノシティ 424 fb^{-1} の全データ (そのうち 362 fb^{-1} が 387×10^6 の B 中間子崩壊を含むデータ) は Belle 実験の全データの約半分ではないが、新しくなった Belle II 測定器の特長や新規開発の手法を組み合わせることにより、さまざまな興味深い新しい成果を出せるようになってきている。ここ半年間で、12 の新しい結果を論文として投稿した (参照 (1))。以下にその一部を紹介する。

- 荷電 B 中間子の荷電 K 中間子とニュートリノ対への崩壊過程 ($B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$) は標準理論においては量子効果による中間状態として質量の大きなトップクォークと W ボゾンが寄与することにより生じる。もし、未知のさらに質量の大きな新粒子の量子効果による寄与があれば、この過程の崩壊分岐比の標準理論からのずれとして現われる。ニュートリノを直接測定することができないため解析が難しくこれまで未発見であったが、機械学習を用いた解析手法の高度化、背景事象のより精密な見積り手法の確立、2通りの解析手法による相互検証により、 3.5σ で統計的に有意な信号の証拠を補えた。測定された崩壊分岐比はこれまでの探索結果と矛盾せず、標準理論からのずれは 2.7σ と統計統計的に有意なものではない (図 3、文献 (2))。しかしながら、標準理論の予想値より大きい非常に興味深い結果であり、異なる解析手法や同様の異なる崩壊過程による検証、また今後のデータの追加による検証を進めてゆく。
- B 中間子の D あるいは D^* 中間子、レプトンおよびニュートリノへの三体崩壊 ($B \rightarrow D^{(*)} \ell \bar{\nu}$, $\ell = \tau, \mu, e$) において、標準理論ではすべてのレプトンについて同じ相互作用が働き、レプトンの質量の効果のみが分岐比の違いとなる。ところが、タウレプトンへの分岐比とミューオンあるいは電子への分岐比の比 ($R(D)$ および $R(D^*)$) が標準理論より大きくなる測定が多数報告されており、世界平均で、現在 3σ を越えるずれがある。このため、Belle II の高精度の結果が待ち望まれている。今回、Belle II における初めての $R(D^*)$ の解析結果が得られ、標準理論とも現在の世界平均とも矛盾しない結果となった (図 4、文献 (3))。この解析では現在までのデータの約半分の 189 fb^{-1} しか使われていないが、これまでの Belle 実験の 711 fb^{-1} での結果と同程度の精度が得られており、今後、データの増加に伴い精度を上げてゆくことが期待できる。
- $R(D)$ および $R(D^*)$ のずれは、クォークレベルでの $b \rightarrow c \ell \nu$ の ℓ がタウレプトンの場合とミューオンあるいは電子の場合とのずれから生じると考えることができる。崩壊の終状態に D または D^* 中間子を要求することなしに、包括的にタウとニュートリノを終状態に含む反応 $B \rightarrow X \tau \nu$ を測定することは、クォークレベルでの反応を測定することに相当するが、制約条件が少ないため非常に難しい。Belle II では初めてこの測定の試みが成功し、包括的崩壊でのタウレプトンへの分岐比とミューオンあるいは電子への分岐比の比 $R(X)$ を測定した。現状では測定誤差が大きいため標準理論ともこれまでに測定された $R(D)$ および $R(D^*)$ の平均値から予想される $R(X)$ の値とも無矛盾の結果となったが、今後期待できる解析手法を新たに確立することができた (図 4、文献 (4))。

論文として投稿した他の成果は、 B 中間子のセミレプトニック崩壊の測定、小林益川ユニタリティ三角形の角度 ϕ_3 の測定、 B 中間子の $K\pi$ および $\pi\pi$ への二体崩壊の測定、暗黒物質に関

係する未知の粒子の探索、および新共鳴状態の研究についてのもので、その一部はすでに出版されている。

この他にも、LS1 までに収集されたデータを用いることにより、これまで Belle 実験で行われてきた数多くの測定において Belle II でも同程度あるいはそれ以上の精度で行うことが可能となるものが多数あり、物理解析および論文投稿の準備を精力的に進めている。

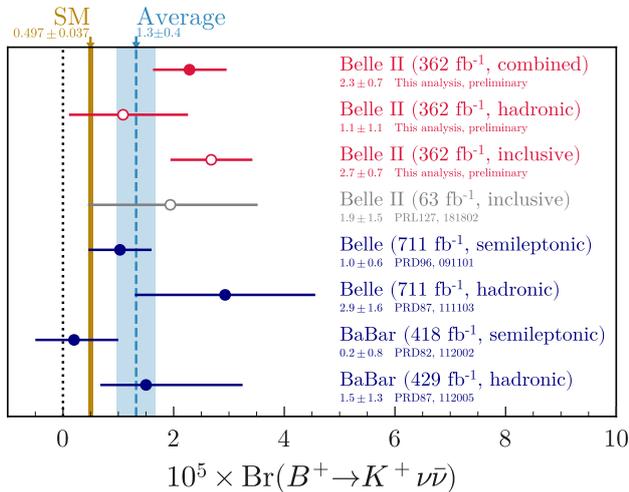


図 3: Belle II での $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ の分岐比とこれまでの探索結果および標準理論 (SM) との比較。

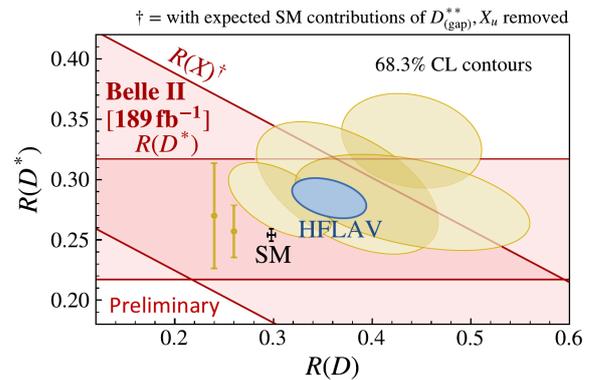


図 4: Belle II で測定された $R(D^*)$ および $R(X)$ と、これまでの $R(D)$ および $R(D^*)$ の世界平均 (HFLAV) および標準理論 (SM) との比較。

3 Belle データ解析の状況

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。ここ半年の間に、小林益川行列要素 V_{cb} および V_{ub} の精密測定に関わる研究、 B 中間子および B_s 中間子の新しい崩壊過程の測定および探索、レプトン数やバリオン数を破る崩壊過程の探索、チャームバリオンの研究、暗黒物質候補となりうる粒子の探索、既知の共鳴状態および新共鳴状態の性質の研究などで成果を得ており、10 篇の論文として投稿している (参照 (5))。

Belle 実験のデータ解析はこれまで Belle II 実験グループとは独立に行われてきていたが、現在出版準備中のものを除いて、今後は 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。

4 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:2311.14647 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (3) Belle II Collaboration, arxiv:2401.02840 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (4) Belle II Collaboration, arxiv:2311.07248 (Phys. Rev. Lett. に投稿中)
- (5) Belle 投稿論文一覧: https://belle.kek.jp/bdocs/b_journal.html