

1 Belle II 長期運転停止期間中の作業状況と計画

2022 年 6 月のビーム運転終了から SuperKEKB/Belle II は長期運転停止期間 (LS1) に突入し、LS1 後のさらなるルミノシティ増強に向けて、加速器と検出器の改良・改修作業を進めている。以下に、Belle II 検出器に関する主な作業の進捗と計画を説明する。

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、未実装部のあった PXD を全てのセンサーを実装したものへ交換し、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へ交換する。ドイツで組み立てた新しい PXD を試験をしていた段階で、検出器の熱変形を吸収するための摺動機構に不備があることが判明したが、問題点の解明を行い、摺動機構への修正を加えることにより解決した。2023 年 4 月に、KEK に搬入された PXD の新型衝突点ビームパイプへの取り付けを完了させ (図 1 右上)、検出器性能及び摺動性能を確認した。この確認を以て、PXD 交換のために Belle II 測定器から古い VXD を取り出して交換作業を進める最終決断を行った。

VXD の取り出し作業は 5 月 10 日に完了し (図 1 左)、取り出した VXD から再利用する SVD を分離する作業を 5 月 17 日に完了した (図 1 右下)。SVD の分離作業は今回が初めての試みであったため、約 2 年にわたるモックアップを用いた分離手法の開発・研究と、共同研究者を交えた 3 度の内部審査を経て確立した作業手順に従った。分離作業は円滑に進める事ができ、分離した SVD の性能評価試験を 6 月 2 日まで行った。この結果から以上の作業による SVD への損傷が無いことを確認した。



図 1: (左) VXD の取り出し作業の様子、(右上) 新型衝突点ビームパイプへの取り付けが完了した PXD、(右下) 取り出した VXD を半分に分割して分離した SVD の片側。

今後の予定として、まず6月中旬に新しいPXDと取り出したSVDとを合体させ新しいVXDを組み上げる。組み上げ後のVXDの性能評価を行い、8月上旬までに、新しいVXDのBelle II測定器への取り付けを行う。その後、必要なケーブル・配管作業および性能評価試験を経て、10月上旬までに全ての交換作業を完了させる予定である。

バレル部の粒子識別装置(TOP)ではマイクロチャンネルプレート型光電子増倍管(MCP-PMT)を使用しているが、数多くのMCP-PMTで、これまでの実験での量子効率の低下が問題となっていた。そこで量子効率低下したMCP-PMTをより量子効率の低下しにくい長寿命のものに交換する作業を2月中旬から開始し、5月初頭に完了させた。レーザー光による性能試験により、交換作業後の十分な性能を確認した。

中央ドリフトチェンバー(CDC)では、実験中に観測されたゲイン低下を改善すべく、いくつかの改良作業を進めている。1つ目は、高電圧印加回路にあるローパスフィルタの抵抗をより抵抗値の低いものに交換する作業で、これにより実験中の暗電流増加に伴う検出器内部の電圧降下を抑制する。この抵抗交換作業は2023年1月中に無事に完了した。2つ目は、検出器ガスの循環系統及び計測系統の改良である。ガス配管に生じた損傷を修理し、さらにこのような問題の早期発見のためにガス中の水分濃度や酸素濃度の計測器の信頼性と冗長性を改善する。水分濃度計の作業は完了しており、酸素濃度計の作業は7月頃の完了を目標に進めている。これらに加えて、検出器内部のガス循環の均一性の向上のために、検出器からのガス排出口を現行の4か所から倍の8か所に増やす作業を進めており、6月中旬までに完了させる予定である。また、新しく交換するVXDのための保持機構の更新を行い(図2左)、TOPのMCP-PMT交換作業のために外した全てのケーブル類と約100枚の読み出しボードの復旧作業を進めている(図2右)。

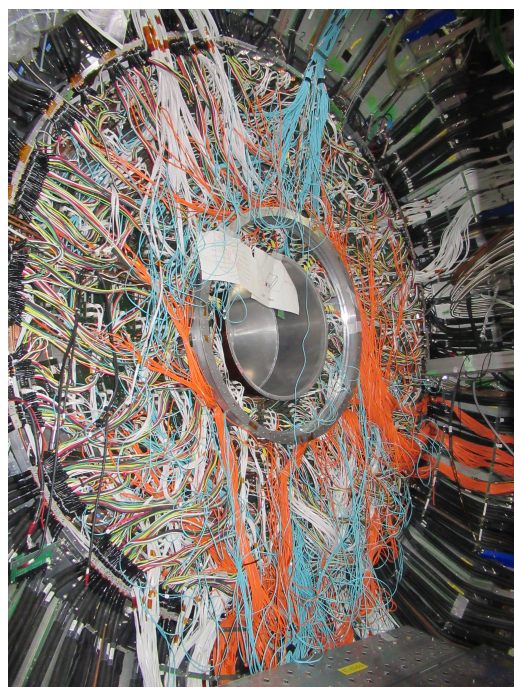
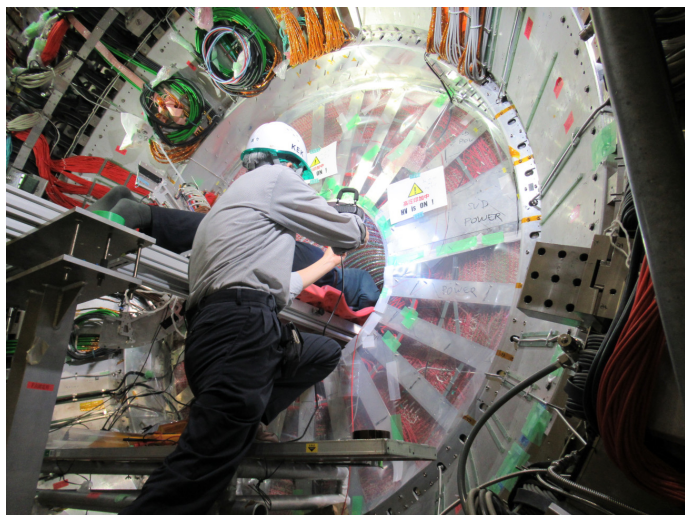


図 2: (左) CDC 前方側での VXD 保持部の交換作業、(右) 読み出しボード復旧作業中の CDC 後方側。

K_L/μ 粒子検出器(KLM)で使用されている高抵抗板状検出器(Resistive Plate Chamber、RPC)でも実験中に長期間にわたるゲイン低下が見られている。対策として、RPCへのアンモ

ニアガスの注入によりゲインを回復する手法を検討している。実機 RPC と同様の製作方法で作られた試験用検出器を使用して、ゲイン回復量の定量的評価とアンモニアガスの検出器に対する安全性の検証を進めている。7 月中にこの対策を実施するかどうかを決定する予定である。さらに、ゲイン低下の要因と考えられる RPC ガス中の水分濃度の増加や、この濃度増加を引き起こしていたであろうガス流量の低下をすみやかに検知できるように、ガス計測器の改良作業（水分濃度計・バブラー流量計システムの導入）を進めており、LS1 後により安定した検出器運転が可能となるようにする。

以上の作業に加えて、電磁カロリメータ (ECL) ではビーム入射ノイズの影響を緩和するための新しい信号波高再構成アルゴリズムを開発しており、初段トリガーシステム (TRG) では様々なトリガーアルゴリズムの改良を進めている。さらに実験中のビーム由来の中性子による様々な検出器への影響を緩和するために、最終収束超伝導電磁石 (QCS) 表面に追加する中性子遮蔽体の開発を進めている。この遮蔽体の設計は概ね完了し、2023 年 9 月の設置作業に向けて製作を進めている。

2 Belle II データ解析の状況

Belle II 実験でのデータ蓄積が進み、新しくなった Belle II 検出器の特長や新規開発の手法を組み合わせることにより、Belle 実験での精度を越える結果を出せる解析テーマが増えてきた。ここ半年間で、昨年度の夏までに収集された 362 fb^{-1} の B 中間子崩壊の全データなどを用いて新たに 9 つ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。

- 未知の Z' 粒子を含む $L_\mu - L_\tau$ 模型は、現在問題となっているミューオン $g-2$ の実験結果と標準理論とのずれ (アノマリー) を説明することのできる仮説のひとつである。Belle II 実験で Z' 粒子が生成され、さらに検出できない粒子に崩壊する事象を探索することにより、世界で初めてこの仮説によりミューオン $g-2$ アノマリーを説明できる領域を棄却した (図 3、文献 (2))。
- これまで Belle 実験などで、さまざまなレプトン数を破るタウレプトンの崩壊過程が探索されてきたが、未知の検出できない中性ボゾン α を伴う崩壊過程に関しては、過去の ARGUS 実験の報告以降は探索されていなかった。Belle II 実験のデータを用いてタウレプトンの軽いレプトンと見えないボゾン α への崩壊を探索し、過去の ARGUS 実験の崩壊分岐比の上限を最大で 14 倍改善した (文献 (3))。
- 中性 B 中間子の 2 個の π^0 中間子への崩壊過程 ($B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$) の崩壊分岐比と CP 非対称性は小林益川ユニタリティ三角形の内角のひとつである ϕ_2 を決定するために必要な重要な物理量である。この崩壊過程では 2 個の π^0 がどちらも荷電粒子の飛跡を残さずに二つの光子に崩壊するため、背景事象の多い LHC における実験では測定が不可能だと考えられている。使用したデータ量は過去の Belle 実験の数分の一と少ないが、光子の選別手法の大幅な改善により、崩壊分岐比の測定において同程度の精度を達成した (文献 (4))。
- タウレプトンの質量は素粒子物理学の重要な基本パラメータのひとつであり、レプトン普遍性の検証に重要である。標準理論でのタウレプトン崩壊は必ずニュートリノを伴う

ため、そのままでは不変質量を測定できない。そこで、タウレプトンの3個の π 中間子とニュートリノへの崩壊($\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$)を用いると、最大値がタウレプトンの質量になる疑似質量を計算できることを利用して、その分布の上限からタウレプトンの質量の測定を行った。衝突ビームのエネルギー、荷電粒子の運動量測定などの不定性を抑えることに成功し、タウレプトンの質量を世界最高精度で測定した(図4、文献(5))。

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ほとんどの測定を 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ため、これらの他にもさまざまな物理解析が精力的に進められており、すでに投稿されたものの他にも多数の論文を投稿する準備を進めている。

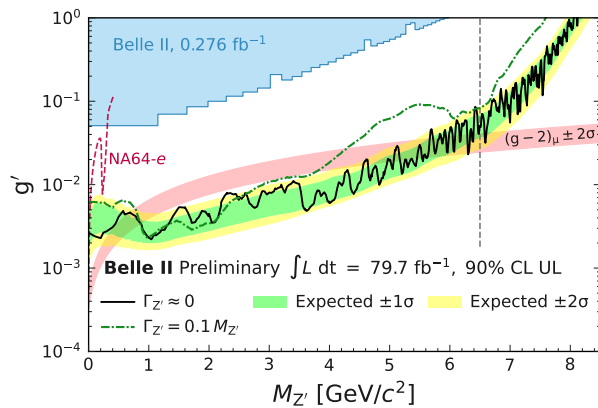


図3: Z' 粒子の検出できない粒子への崩壊の結合定数の上限(黒い曲線)がこれまで許されていた $g-2$ の領域(ピンク)をほぼ棄却している様子。

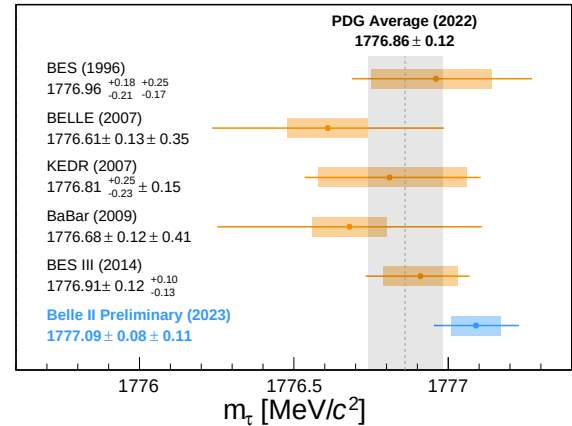


図4: これまでのタウレプトン質量の測定結果と Belle II での測定結果の比較。

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、新たな B 中間子および B_s 中間子崩壊過程の探索、 D 中間子崩壊における CP 対称性の破れの探索、 τ レプトン崩壊の研究、新共鳴状態の性質の研究などで成果を得ており、論文として投稿している(参照(6))。

4 参考資料

- (1) Belle II 投稿論文一覧: <https://confluence.desy.de/display/BI/Journal+Publications>
- (2) Belle II Collaboration, arxiv:2212.03066 (Phys. Rev. Lett. に掲載予定)
- (3) Belle II Collaboration, Phys. Rev. Lett. **130**, 181803 (2023) (arxiv:2208.13189)
- (4) Belle II Collaboration, arxiv:2303.08354 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (5) Belle II Collaboration, arxiv:2305.19116 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (6) Belle 投稿論文一覧: https://belle.kek.jp/bdocs/b_journal.html