

Belle 検出器の回転

KEK 加速器研究施設

森田 昭夫

akio.morita@kek.jp

KEK 素粒子原子核研究所

中村 勇

isamu.nakamura@kek.jp

2013 年 (平成 25 年) 8 月 16 日

1 はじめに

KEKB 加速器を用いた Belle 実験は 2010 年 6 月に運転を終了し、現在、SuperKEKB 加速器、Belle II 検出器へのアップグレードが行われている。その過程で、重さ 1400t の Belle 検出器を回転させるという大作業が昨年度に行われた。この作業について、回転を行うことになった動機とともに報告する。なお、本稿は 2 章を森田が、3 章以降を中村が執筆した。

2 動機と背景 - 光学設計の辿った道程

かつての SuperKEKB の設計案は、“Letter of Intent for KEK Super B Factory” [1] にまとめられている通り、現行の設計と大きく異なるもので、KEKB B-Factory でテストされた crab crossing 方式を採用しビームビームチューンシフト¹ ξ_y を 0.2 程度まで高め、蓄積電流を 4 倍程度まで増やすというもので、 ξ_y の設計値以外は保守的²な光学設計であった。現在の設計に至る基本設計の大変更は、2009 年 2 月に開かれた 14th KEKB Accelerator Review Committee³にまで遡る。当時、SuperKEKB の設計では最終収束系で発生する放射光を処理するための衝突点ビームパイプの設計と光学設計の両立や、大電流による真空系への負荷が技術的な障害となっていた。また、イタリアのグループは、ILC の衝突点とダンピングリングの設計を援用して、 $10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を越えるルミノシティの SuperB 計画を提案していた。こうした背景の元で、KEKB Accelerator Review Committee が出

¹ビームビーム相互作用による収束力によるベータatron振動数(チューン)の変位(シフト)の大きさを表す無次元量で、ビームビーム相互作用の強さの目安。

²KEKB B-factory[2] の crab crossing で実現したビームビームチューンシフト ξ_y は、0.129/0.090(LER/HER) であり、約 2 倍となる設計目標値 0.2 は円形衝突型加速器としては未知の領域である。

³<http://www-kekb.kek.jp/MAC/2009/>

した答申は、「イタリアで提案されてる low emittance option が適用可能かの検討を行なうべし」というものであった。この答申を受けて、“nano-beam scheme” と呼ばれる、比較的大きな交差角のもとで非常に細く絞ったビーム同士を衝突させることで実効的なビームの衝突断面積を小さく保つ手法を用い、当初案の半分程度の蓄積電流で $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを狙う現在の SuperKEKB[3] の光学設計へと続く設計検討が開始された。

2.1 Separated-Q 配置の確立

アーク部の低エミッタンス化の検討が 2009 年 2 月中旬に始まり、最初期の衝突点部を含む光学系の試算が 2 月下旬頃から始まった。

最初期の試案では、KEKB B-factory のアーク部を改変し、LER に関しては主偏向電磁石の延長による曲率の低減、HER に関してはアークの周期長の短縮により水平エミッタンスを 1 nm 程度⁴まで低減した光学系にイタリアの SuperB の設計を参考にしたソレノイドを含まない衝突点を組み込んだものであった。この時点の軌道交差角は 60 mrad であり、最終収束系の配置は KEKB B-factory と同様の衝突点から 400 mm 付近に置かれた最終収束を行なう四重極電磁石を 2 リングで共有する図 1 中の Shared-Q 配置であり、衝突点 β 関数の目標値は LER で $(\beta_x, \beta_y) \sim (20 \text{ mm}, 200 \mu\text{m})$ 程度であった。2 リングで共有する四重極電磁石に発生する大きな水平方向の軌道偏向は、トンネル内に軌道を維持することを困難にすると同時に、大きな水平分散を生じ水平エミッタンスを増加させる問題を有しており、作業ノートには

⁴LER では、アークセルの平衡エミッタンスで 2 nm、KEKB B-factory の damping wiggler の効果込みで 1 nm とする試案であったが、後に wiggler モデリングの間違いが判明しており、当時の設計案の正しい水平エミッタンスは 3 nm を越えていたと思われる。

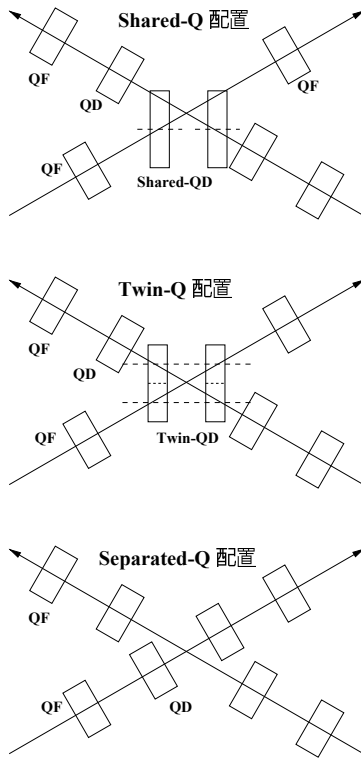


図 1: 最終収束四重極電磁石のレイアウト模式図

2009年3月2日付けの試算として、衝突点部以外の平衡エミッタンス 1.08 nm に対して、衝突点部の平衡エミッタンス 21.0 nm という目標値より1桁大きい値が記録されていることからその困難性が窺える。

結局、光学設計ではエミッタンス増大とトンネルの幾何条件を同時に解決することができず、Shared-Q 配置を諦めることとなった。2009年3月下旬には、各リングに独立な最終収束四重極電磁石を設置し、その配置はイタリアの SuperB のような眼鏡型の Twin-Q を新規開発するのではなく、HER 側の四重極電磁石を衝突点から遠ざける方向にずらして2リングの電磁石を互い違いに設置する Separated-Q 配置の方針が確立した。結果として、四重極電磁石の設置スペースを確保するために LER も含め最終収束系全体が衝突点から遠ざかることとなり、SuperB に比べて色収差補正の難易度を上げることとなった。

2.2 軌道交差角の確立

この時点までは、ビームエネルギーは KEKB B-factory と同様の LER 3.5 GeV ・HER 8 GeV で設計検討が進められていた。しかし、2009年4月頃には、バンチ内の粒子散乱⁵を加えたより現実的な計算から、設計電流での LER のエミッタンスが設計値を大きく超過することが判明していた。このバンチ内散乱の影響は、エミッタ

ンス(ビームの体積)が小さいほど、ビームエネルギーが低いほど強く現れるため、設計中の光学パラメータでは 1 nm 級のエミッタンスは実現不可能であった。設計電流での LER エミッタンスを低減するために、ビームエネルギーは LER 4 GeV ・HER 7 GeV へと変更⁶された。この変更により、当時の試算では、0-current での LER エミッタンスが 1.1 nm から 1.5 nm へ増加するのに対し電荷密度 $6.8 \times 10^{10} \text{ positron/bunch}$ 、カップリングパラメータ⁷ $\kappa = 5.2 \times 10^{-3}$ でのエミッタンスは、 2.5 nm から 2.2 nm へ低減された。一方、バンチ内散乱の影響を受けにくい HER では、エネルギー低下によるエミッタンスの低減が期待できるようになったために、アークの周期長短縮を行わず KEKB B-factory のアーク構造に小規模な改変を施して流用する可能性が出てきた。後に、コストと工期圧縮を目的に、KEKB B-factory HER のアーク部をそのまま流用可能となるように全体的なビームパラメータの再検討が行なわれ、エミッタンスの設計値は現在の組み合わせである LER 3.2 nm ・HER 4.6 nm へと変わってゆくことになった。

同じ頃、衝突点近傍の軌道設計も大きな転機を迎えていた。SuperKEKB では最終収束系から発生する大きな色収差を補正するために、両リングに局所色収差補正を設置することになっていた。色収差補正の補正量は、色収差補正用の六重極電磁石での六重極磁場の強さ (K_2)・垂直 β 関数 (β_y)・水平分散 (η_x) の積に比例しているが、磁場の有効長を一定とする場合、磁場強度と β 関数の積 ($K_2 \cdot \beta_y$) が閾値を越えると六重極磁場の非線形効果⁸によって力学口径がなくなるために、実現可能な六重極電磁石を想定すると一定以上の水平分散が必要となる。しかし、水平分散を得るには偏向電磁石による軌道偏向が必要であり、水平分散を持つ偏向電磁石はエミッタンスの発生源にもなるため、実用的に得られる水平分散の大きさは、軌道の幾何設計に大きく依存している。Damping wiggler によるエミッタンス増加の抑制が期待できる LER では、シケイン型の構成を採用し全体の軌道偏向角に依らず⁹比較的大きな水平分散を得られているのに対し、HER ではエミッタンス増加を抑えるため¹⁰アークセル型の構成をしており色収差補正部の軌道偏向角と水平分散は比例関係にあった。HER の色収差補正に必要な水平分散を得るための軌道偏向角をトンネル境界に納めるために、衝突点での HER の軌道はトン

⁶Y(4S)の共鳴を狙うため、衝突重心系のエネルギーは一定である。

⁷垂直エミッタンスと水平エミッタンスの比を表す無次元量。ここでは、光学系のエラーや空間電荷効果、ビームビーム効果を含めて実現できるであろう値、若しくは、ルミノシティ設計における想定値である。

⁸2台の六重極電磁石を組み合わせ、色収差補正効果が加算され非線形効果を相殺するように設計しているが、有限の厚みを持つが故に相殺しきれない部分が残るため

⁹シケイン内部で局所的に大きな軌道偏向角を持てるため。

¹⁰当時の HER の目標水平エミッタンスは 2 nm であった。

⁵intra beam scattering

ネル軸に対して 50 mrad の角度を持つように最適化されたのは 2009 年 6 月頃の事である。さらに、2009 年 8 月頃に、衝突点から遠くなっていた最終収束四重極電磁石による力学口径を改善するために LER 側の軌道を調整することでビームの交差角を 60 mrad から 83 mrad へ増やして最終収束四重極電磁石を衝突点に近づける変更が行なわれ、衝突点での軌道が確定した。

2.3 ソレノイド軸の確立

光学設計において、ソレノイド軸をどこに据えるかの考察が始まったのは 2009 年 7 月頃のことであり、その時点では、従来の Belle 検出器の軸に合わせる、交差角をエネルギー比で分割する、トンネル軸に合わせるなど様々な案が提案されていたが、光学モデルにはソレノイドは含まれていなかった。軸対称な 2 次元計算に基づくソレノイド磁場を含む光学系のモデリング作業が 2009 年 9 月頃に開始され、10 月に入る頃にはソレノイドを含む光学モデルを使った具体的な設計検討が開始された。

ソレノイド軸に対して水平面内で斜行した軌道で衝突点を通過するビームが、ソレノイド磁場に巻きつくことにより垂直方向に偏向されることは事前に予想されていたことであるが、ソレノイド軸上での磁場強度 $B_s(z)$ の変化に伴って生じるソレノイド軸からの距離に比例した動径方向磁場 $B_r(r, z) \sim -r \frac{\partial B_s(z)}{\partial z}$ の影響がそれ以上に大きく、ソレノイド軸に対する傾きが大きなリングでは、これに伴う垂直分散の発生により垂直エミッタンスがカップリングパラメータの設計値を上回ることが判明した。ソレノイドフリンジからの垂直エミッタンスへの影響は、ソレノイド軸とビーム軌道のなす角 θ に対して θ^4 に比例し、図 2 に示すような依存性があるために、ビーム交差角を 2 分割する軸にソレノイド軸を合わせる以外の選択肢はありえなかった。2010 年 1 月頃に決定されたこの設計方針により、筑波トンネル軸に対して 8.5 mrad¹¹ 傾斜した現在の Belle II ソレノイド軸が確定した。KEKB B-factory の Belle ソレノイド軸は、筑波トンネル軸に対して Belle II と逆方向に 17.45 mrad 傾斜していたので、ソレノイド軸を 25.95 mrad ほど回転させることになる。

2.4 光学モデルの精密化と時間切れ

ソレノイド軸の確定によって、光学設計は概念設計の段階を終えて具体的な機器設計を反映した詳細設計へと進んでゆくこととなった。衝突点部の設計が具体化するにつれ、エミッタンス性能を改善するためのソレノイド磁場分布の最適化や漏れ磁場キャンセルコイルや磁気

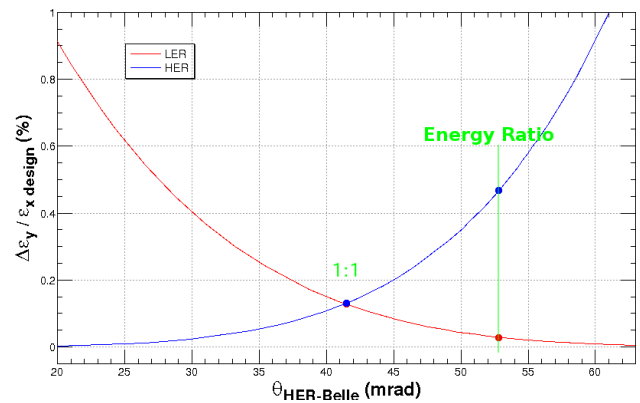


図 2: ソレノイド由来の垂直エミッタンスの交差角依存性

シールドなどが導入されてゆき、対応する光学モデルには四重極電磁石や漏れ磁場の多重極展開¹²や、3次元磁場計算に基づく磁気シールドを組み込んだソレノイド磁場モデル¹³が取り入れられてゆくことになった。光学モデルの精密化に伴って顕在化する新しい光学性能上の問題解決や検出器へのバックグラウンド低減のための様々な設計変更とそれに伴う光学モデルの修正と再計算が繰り返された。

Belle II ソレノイド軸を Belle ソレノイド軸から回転させるという設計案に対しては、Belle II グループ側からの異論もあり、検討中の設計案の詳細設計完了後に別案を検討するという約束になっていたが、詳細設計完了前にスケジュール上のタイムリミットを迎え Belle II を回転することになったのが実状である。

3 Belle 回転

Belle を物理的に回転させるという話が Belle II のグループに広く伝えられたのは 2009 年 7 月の第 4 回 Belle II Open Meeting のときだったと記憶している。当時はいわゆる nano-beam scheme での光学設計が始まったばかりだったため、物理屋側はそれほど真剣に聞いていなかったと思う。漠然とはあるが加速器の人達が (KEKB でさまざまな困難を乗り越えたように) 回転せずに問題を解決できるという期待をもっていた。そのようなわけで、物理屋側の対応としては、当時行われていた運転終了後のロールアウトおよび解体の検討で、コンタクトを取っていた企業にアイデアを聞く程度のものであった。

その後、加速器側の懸命の努力にもかかわらず、Belle を回転させずに十分な性能を得られる光学設計が出来ず、2011 年の夏頃に Belle の回転が決定したのは 2 章の通りである。

¹²2010 年 3 月に収束磁場の主成分の軸上分布が導入され、本格的な多重極展開の導入されたのは 9 月頃である。

¹³2011 年 8 月頃に 3 次元計算モデルの構築が開始され、光学モデルへの導入は 12 月頃から開始された。

¹¹8.5 mrad = 50 mrad - 83 mrad / 2

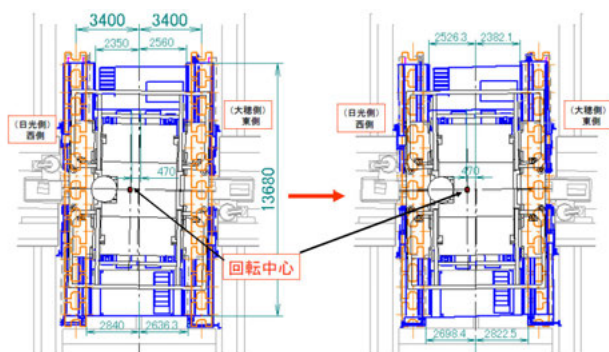


図3: Belleを上から見た図。左)回転前右)回転後。ビームは図で Belle を左右に貫く。赤い部分が台車。図で反時計回りに 25.95mrad 回転させる。

Belle 側では回転の決定を受けて、幅氏をリーダーとして回転グループ¹⁴が形成されていき、設計施行を請け負って頂けそうな企業とコンタクトを取り始めたのが10月頃。実際いくつもの企業に KEK にお越し頂いて、現場を見ながら打ち合わせをし、施行法の検討をお願いした。

そのときに話し合った基本的な仕様は、

- 1) こちらの指定する角度 (25.95 mrad) Belle を回し、指定する位置に設置する (設置精度は 500 μm)。図3参照。
- 2) 回転作業後、少なくとも一度ロールアウト、ロールインするので、位置、角度の再現性が必要。
- 3) 作業中の振動は 0.05 G 以下。

数社から真剣な提案を頂き、打ち合わせを重ねていったのだが、このとき、物理屋にありがちなことに、打ち合わせしながら考えるという感じになって企業の方にはずいぶん迷惑をかけた。最終的には、実行可能であると判断できる施行計画をいくつか作っていただき、2012年7月に行われた入札により、成和リニューアルワークス(以下成和)に請け負ってもらうことになった。総工費約1.4億。

4 Belleの回し方

回転の方法を書く前に Belle について簡単に説明しておく。Belle は 2009 年の実験終了後、運転位置からロールアウトされ、アップグレードへ向けて Barrel Calorimeter より内側に設置されていた全ての検出器 (PID 検出器、中央飛跡検出器、シリコン崩壊点検出器、Endcap Calorimeter 等) が取り外された状態となっていた。図4はビームエリアからロールアウトされた状態の Belle 検

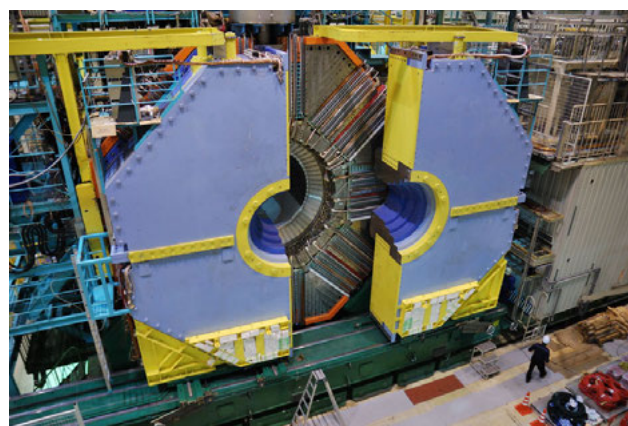


図4: ロールアウト位置にある Belle 検出器。End Yoke が片側だけ開放されている。緑色の部分が下部フレームと台車。右側にエレキハットが連結されている。

出器。Belle は End Yoke を閉じた状態では一辺約 8m の立方体の四隅を落とした八角柱をしていて、それが拡張された TOPAZ 検出器 (TRISTAN 時代の実験装置) の台 (下部フレームと呼ぶ) に乗っている。この下部フレームは 100t ジャッキを介して前後それぞれ 8 台、計 16 台の台車に乗っていて、これが、実験室の床に敷かれた線路の上に乗っている (図5左参照)。下部フレームより上の重量は 1400t 程度。台車はジャッキ付きの弾み車で動力は無く、Belle の走行は下部フレームに取り付けられた駆動装置からピニオンギアを床に埋め込まれたラックに降ろして行う。

回転の方法だが、成和からの提案は、台車を改造してスライド機構を取り付け (図5右参照)、下部フレームと台車の間を滑らせて回転させるというもの。一旦台車を取り外さないといけないので作業は大変だが、作業が終われば回転したまま Belle の走行が可能となる。図5は私が Collaboration Meeting で工法を説明したときに使ったヘタクソな図だが、参考にして欲しい。



図5: 回転法の模式図。左上) Belle を上から見た図。左下) Belle をビーム軸から見た図。右) 台車の改造のアイデア図。

¹⁴ 幅淳二素核研教授 (リーダー)、林浩平素核研技師、山岡広加速器先任技師、中村

5 回転作業

では、実際の回転作業を順に説明していく。

5.1 縁切りと地震対策

Belle には読み出しの回路やトリガー装置等が設置されたエレキハットと呼ばれるコンテナが連結されていてソレノイドの冷却配管やケーブル、その他冷却用の配管、大量の信号、電源ケーブルなどが張ってある。この部分は回転しないので切り離す必要があるがもちろんそのことは考慮されていない。一番大がかりだったのは冷却や乾燥空気の配管で一旦全て切断し養生した後、Belle 側にパッチパネルを設置して対応した。切断だけで一週間、全体で一ヶ月程かかった。

回転作業時には当然 Belle は動かすことになるが、既に設置されている検出器が壊れないよう、振動は最大 0.05G 以下にするよう要請した。そのため Barrel Yoke の前後の端に一台ずつ加速度計を設置し、0.05G 以上の加速度を検出したときには警報が鳴るようにして、Belle を振動から守ることにした。結局作業が終わるまでにこの警報が発報したのは 12 月 7 日に起きた地震 (震度 4) のときのみで、そのときの値は 0.1G であった。また、いろいろな作業時に地震が起きても Belle が動いてしまわないよう随時拘束金具を床に取り付けて Belle が動かないよう対策が行われた。

5.2 台車の取り外しと改造

準備作業が終わり実際の台車取り外し作業のため成和が乗り込んだのが 10 月 25 日。約二週間かけて台車の取り外し搬出作業が行われた。上にも書いたが台車には 100t ジャッキが取り付けられていてこのジャッキの球形の先端に下部フレームの下面に設置された皿が乗っている。この台車を取り外すため約 10cm Belle を持ち上げる。まずは Belle を仮支えするための馬 (サドル) を台車と台車の間に設置し、その後台車の 100t ジャッキを使って全体を限界までジャッキアップする。この状態でサドルと下部フレームのすき間にライナーを入れて Belle を高い位置に固定した後、今度は限界までジャッキを下げる。すると下部フレームとジャッキ上端の間にすき間が出来るのでここにライナーを入れる (図 6 左上)。ジャッキのストロークが 5cm しかないのをこれを三度繰り返して所定の高さまで Belle を持ち上げる。その後台車を一台ずつ取り出して (図 6 右上)、別の 100t ジャッキに置き換えていく。全ての台車を取り外されたら、最後の仕上げとしてサドルを筋交いでつないで万全の地震対策が取られた (図 6 下)。作業終了は記録によると 11 月 9 日。



図 6: 台車取り外しの様子

5.3 台車改造

台車の改造は行田市にある成和の工場で行われた。まず、台車と下部フレームの間にスライド機構を入れないといけないので、100t ジャッキの取り付け位置を下げる。そして、台車の取り付け位置に応じて異なる移動方向を受け持つジャッキをとりつける。四隅の台車には回転用のジャッキが、その内側二台の台車には X 軸と Y 軸の台車がとりつけられ、一番内側の台車には摺動部材のみがとりつけられる。摺動部材は白いテフロン製の板で台車の上部に設置される。台車改造時には、TOPAZ 建設時から一度も手入れされていなかった 100t ジャッキも製造元にメンテしてもらい、改造された最初の台車 (図 7 左) は 1 月 16 日に筑波実験棟に搬入された。

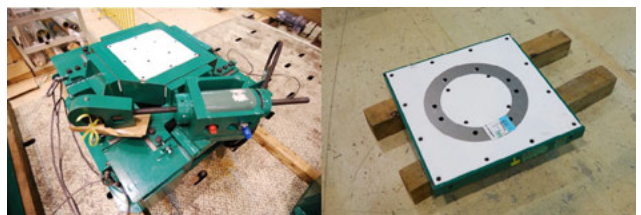


図 7: 左) 改造され回転用のジャッキと摺動部材が取り付けられた台車。右) 下部フレームにとりつけられる摺動部

5.4 台車再取り付けとロールイン

2013 年の年明けとともに筑波実験棟での作業は開始。台車の再取り付けは基本的に取り外しと逆プロセスだが、スライド機構を挿入するため下部フレームの下面にテフロン板のついた部材 (図 7 右) を取り付ける。下部フレーム側は (当り前だが) 改造を想定していないので、下

に潜り込んでの溶接、切削の作業が多くなり時間がかかる。台車取り付け作業と並行して、ビームライン位置では衝突位置周りの測量と床の墨打ちが進められる。床には Belle をロールイン位置で正確に固定するためにアンカーの穴が打たれているのだが、Belle が回転するので一旦掘り返し新たなアンカーを打設する。また、回転時に回転軸を固定するために回転中心にも同様にアンカー穴を埋める。

ロールインが行われたのは 2 月 7 日。Belle の駆動装置は TOPAZ からお下がりなのでとても古いものだが、ロールイン後は取り外されてしまうのでこれが最後の駆動になった。走行距離は約 13m。途中で二度停止して、重い Belle が動くことによる床の動きが加速器グループにより測量された。Belle の停止位置はあらかじめ決めてあるので、側面から測量器で覗いて指示を出し mm 位の精度で仮置きしたのち、床に固定用の金具を設置して固定。

5.5 回転準備

ロールイン後最初の作業は反力受けの取り付け。Belle を回転、平行移動させる作業は台車と Belle の下部フレームの間に取付けた滑る部分(摺動部)とジャッキにより行われるわけだが、台車を実験室の床に対して固定しておかないと反作用を受け止められない。そのため、片側の台車 8 台は連結金具でつないで一体化し、台車を床に対して強固に固定できる反力受けを設置して台車を固定する(図 8 左上)。

Belle を駆動した駆動装置は Belle の中心下部に据え付けられているのだが、回転後にはピニオンギアがラックからずれてしまい使えなくなるので取り外し、代わりに回転中心を固定するピンを取り付ける。ピンといっても鉄製の構造物なのでひどく重く、取り付けはかなり難儀した。

最後に、回転前の Belle の位置、高さ、水平を調整したら、中心固定ピンを床に設置したアンカー穴に降ろして Belle を固定して回転準備は完了(図 8 右上)。2 月 15 日。

5.6 回転と測量

回転作業の開始は 2 月 16 日。四隅の台車に取り付けた回転用のジャッキを駆動して回すのだが、これらジャッキに取り付けられた油圧装置は 4 台までのジャッキを協調制御できるようになっている。制御の input は変位計で、それぞれのジャッキの乗った台車と Belle 下部フレームの間に取付けて相対位置の変化をモニターし、



図 8: 回転作業の様子

決まった変位量のステップでジャッキをコントロールしていく(図 8 左下)。

全ての準備が終わって最初の回転作業を行ったのが 15:40 頃。全体の移動量はジャッキのストロークにして合計 20cm 弱。初日は 5cm の予定。ちゃんと摺動部分が滑ってくれるのかかなりドキドキしたが、その部分は問題なく動いてくれた。図 8 右下は油圧装置のコントロールパネルで記念すべき最初の回転作業時のもの。パネルの表示でジャッキの出力を読むと 180kN 程度、つまり 20t 弱で滑り出す。ジャッキは二台なのでテフロン面の μ は大体 0.03 程度ということになる。スペック上は 0.1 以下らしいのだが、実際はもっと小さかったということのようだ。

ある程度 Belle が回転すると下部フレームと台車の相対位置がずれる。すると摺動面やジャッキのストロークが足りなくなるので、台車を反力受けに固定していたジャッキを外して自由にし、代わりに下部フレーム(つまり Belle)と反力受けの間にジャッキをかけて床に固定する。この状態で台車を別のジャッキで押してずれた分戻す。こうして回転用のジャッキと下部フレームの相対位置がおおよそ元に戻ったら反力受けを元の状態に戻し、また回転作業を行なう。これを何度か繰り返して目的の回転位置まで回転させる。

Belle がどれだけ回転したかは測量を行って決定する。加速器側の依頼というのは、Belle のソレノイド軸を指定する線上に置くというもの。その位置は加速器の光学設計と、それに基づくトンネル全周にわたる測量により(加速度側としては)決まっている。Belle の方はソレノイドを前もって私が測量することになっていたのだが、力が足りなくて果たせず、加速器の測量をしている電磁石グループに測量してもらったこととなった。手順だが、Barrel Yoke の両側に元々設置されていたそれぞれ 4ヶ所と新たに設置した 8 箇所(合計 24 箇所)のターゲット(図 9)を測量し、その位置を解析して Belle の Geometry

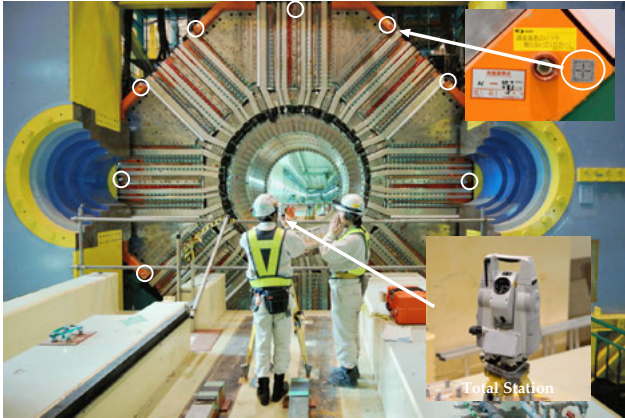


図9: 測量の様子。白丸で示されているのがターゲット。

を Belle に固定された座標系で決める。これを加速器の座標系内で適切な位置に移動回転させると、24 のターゲットの加速器座標系での絶対位置が求まるので、これを今度は実験室で定義された座標系に変換すれば、それぞれのターゲットの実験室で定義された目標座標が得られる。この座標と座標系の取得法を成和の測量担当に渡しておいて、Belle を回していってもらおう訳である。実際仕様として要求した精度は、上に述べたように各点の設置誤差 $500\mu\text{m}$ というもので、ヨークの長さが 5m 位なので、角度の精度は 0.2mrad (0.01 度) 程度ということになる。

回転作業に話を戻すと、回転するための移動量はジャッキのストロークにして合計で 20cm 弱だが、最初の三日で残り 1cm 位まで回してしまい、後は慎重に測量しながら二日間かけて目標の角度に持っていく。図10は回転した Belle の様子になるべく強調されるように撮った写真で下部フレームが台車に対して回転しているのがわかると思う。記録によると回転作業を終えたのは2月21日。

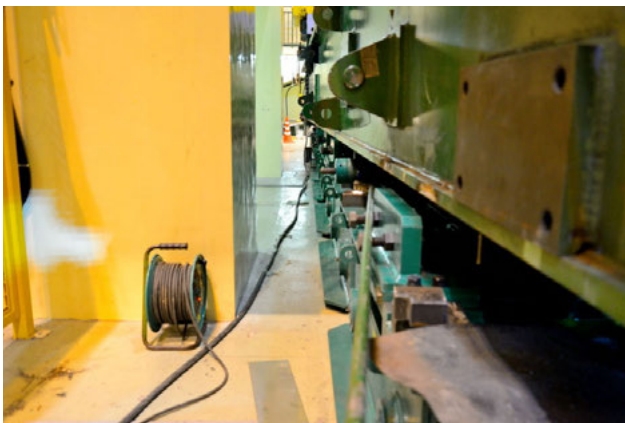


図10: 回転直後の Belle の様子

角度がおおよそ決まったら、回転方向は金具を溶接して拘束してしまい、X-Y 方向の平行移動だけできるようにする。その後、X-Y 方向移動用のジャッキを使って微調整と測量をくり返し目標の位置に動かしていくのだが、これにはかなりの時間を使った。ここで問題となったのは、ジャッキの変位量と実際の Belle の移動量に大きなずれやヒステリシスがあって、なかなか思った移動量が得られなかったこと。また、移動後にはいちいち測量しないといけないので iteration に時間がかかったこと。特に前者は難儀した。今となつては当たり前なのだが、ジャッキと Belle の間にはいろいろと (鉄の構造物と比べて) 軟らかいものが存在するし、また、Belle の構造体自体も歪むことがある。加えていろいろなところが弾性を持っているので、ジャッキや反力受けの固定を解くと動いてしまったりもする。最終的に目的の位置に置けたのが3月4日。その後、再度加速器の人達に測量してもらい、ほぼ目標位置にあることを確認、加速器側の測量で少しずれていた部分を微調整して位置合わせは完了した。3月7日。

最後の仕上げとして、今後のロールアウト、ロールインを仮定し、仮設の駆動装置を使って数 m レール上を移動させ位置が大ききずれないことを確認した後、Belle を床に仮固定して作業終了となった。作業終了は3月22日。

6 おわりに

回転作業後の Belle は、黄金週間明けにロールアウトされ、エレキハットと再結合された状態になっている。今後は、既に始まっている Endcap KL-Muon 検出器の入れ換えをはじめとして Belle II へのインストール作業が本格化する。



図11: 回転作業をして下さった皆様。テレビドラマ「ガリレオ」撮影¹⁶の為に据え付けた足場にて。

¹⁶詳細は <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20130415222000/> を参照のこと。

回転作業に関しては、2016年に予定されているロー
ルイン後、最終決定された SuperKEKB ビームラインに
あわせて再度微調整した後、仮固定されている床のアン
カーホールにモルタルを打って位置決めがなされること
になる。

最後に成和をはじめとして Belle 回転作業に携わった
皆様 (図 11) へ感謝の意を表し 稿を締めたいと思う。

参考文献

- [1] SuperKEKB Task Force, KEK Report **2004-4**,
p.337 (2004).
- [2] T. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **03A001**,
(2013).
- [3] 飯田直子, 高エネルギーニュース **29-1**, p.20 (2010).