

SuperKEKB フェーズ2 コミッショニング

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

大西 幸喜

yukiyoshi.onishi@kek.jp

2018 年 (平成 30 年) 10 月 29 日

1 はじめに

SuperKEKB 計画は、KEKB 計画につづく次世代の B 中間子生成ファクトリーであり、2001 年より検討が始まった。高いエネルギーを目指すかわりに、高い統計量で稀にしか起こらない新物理の探索を目的とする。この研究領域は、ルミノシティ・フロンティアと呼ばれる。検討を始めた当時は、「大電流方式」[1, 2]によりルミノシティを、KEKB 加速器[3, 4]の設計値の10倍以上に高めることを考えていた。この方式において、陽電子蓄積リング(LER)のビーム電流は9.4 A、電子蓄積リング(HER)のビーム電流は4.1 Aを設計値としていた。KEKB 加速器の最大ルミノシティが、まだ $3.4 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ にしか到達していない時期に $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目標としたのである。SuperKEKB 加速器の設計と並行して、KEKB 加速器の電流増加を推し進めてルミノシティが徐々に高くなっていった。設計によると、ほとんど全ての RF バケット(5120のうち約4800バンチ)にビーム¹を詰めるはずであったが、電子雲の影響を完全に排除することができずに平均3.06バケット間隔で運転することを余儀なくされた。電子雲は陽電子ビームの垂直方向のビームサイズを増大させルミノシティ増加効率を悪化させる。この少ないバンチ数で、電流増加を行ったためにバンチ電流が大きい状態で運転を行うことになり、加速器のハードウェアに対して大きな負担をかけることとなった。具体的には、高次モードの電磁波によって、ベローズが発熱し損傷して真空漏れを引き起こしたことを何度か経験した。大電流方式では、後で述べる「砂時計効果」によるルミノシティ増加効率の悪化を避けるために、ビームの進行方向の分布の広がり(バンチ長)を3 mmとできるだけ短くする必要がある。ただし、バンチ内粒子散乱やコヒーレント放射光により、バンチ長は伸びてしまう可能性がある。たとえバンチ長を短くできたとしてもバンチ電流増加とともに、高次モードの電磁波による発熱を増加させるので、大電流方式に

としては、ますます困難な状況となる。しかも、ビームが放射光放出によって失うエネルギーを補償する高周波加速空洞の増強と電気代という意味で運転コストも大きなものとなる。当然、ビームに与える電力効率というものがあるので、損失分はジュール熱となり、それを冷やす冷却システムも増強する必要がある。ルミノシティ性能を示すビーム・パラメータも、0.3と経験で得られた値²を大きく超えることを期待していたこともあり、再考する要因となった。こうした理由により、大電流方式とは異なる衝突方式を模索することになった。ビーム電流は4 Aを超えないこと、バンチ長を極端に短くする必要がないこと、ビーム・パラメータは実績のある値を仮定すること、を設計条件とした。その頃、イタリアでは、フラスカッティ研究所が中心となってSuperB計画に取り組んでいた。その中心メンバーの一人であるPantaleo Raimondi氏が、「ナノビーム方式」と「クラブ・ウエスト」を組み合わせた衝突方式を提案していた[5]。まさに、ナノビーム方式は上で述べた条件を満たす。ナノビーム方式の特徴は、ビーム電流を10 Aと大きくしなくても衝突点ベータ関数を非常に小さくすることによって、 $10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に近いルミノシティが期待できるということである。実際に、SuperKEKB 加速器の最終的な目標ルミノシティは、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。また、バンチ長も短くする必要がなく、ビーム・パラメータの上限値も抑えられることなどが挙げられる。そこで我々はナノビーム方式に着目し、2009年3月からビーム光学設計の検討を始めた。このあたりは「ナノビーム方式」、「クラブ・ウエスト」、「クラブ交差方式」など用語が紛らわしいので注意を要する。これらは、まったく別の概念なので、ここでは「ナノビーム方式」だけを覚えてほしい。

まず、最初に LER のビーム・エネルギーを 4 GeV、HER を 7 GeV と決めた。また、低エミッタンス化するために LER の偏向磁石を既存の短いものから長いもの

¹ビームとは、漠然とした「粒子のまとまり」を意味する。

²KEKB 加速器で到達したビーム・パラメータは、最高で0.09である。

へ交換したり、最終収束を含む衝突点領域のビームラインは、全く新しいものが設計された。83 mrad (KEKB 加速器の場合 22 mrad) という大きな交差角を実現し既存のトンネル内にビームラインを収めるために、Belle II 測定器 [6] を回転させることを決定した [7]。電子雲対策のために窒化チタン (TiN) コーティングされたアンテチェンバーとソレノイド的な永久磁石の導入が検討された。ビーム電流も LER で 3.6 A, HER で 2.6 A に対応できるように、高周波加速空洞システムの増強が計画された。入射器も SuperKEKB の主リングに対応するように大幅なアップグレード計画を打ち立てた。SuperKEKB 加速器の設計については、文献 [8] にマシン・パラメータは古い設計思想について詳しく書かれている。

2010 年 6 月 30 日に KEBK 加速器はビーム運転を終了し、最高ルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成、Belle 測定器は 1040 fb^{-1} のデータを収集した。それから改造期間として約 6 年の時が流れ、2016 年 2 月 8 日から 6 月 28 日までの 5 ヶ月間に SuperKEKB 加速器のフェーズ 1 コミッショニングが行われた [9]。最終収束システム (QCS) [10] と 1.5 T のソレノイドをもつ Belle II 測定器は、フェーズ 1 ではまだ設置されていない。QCS は、主 4 極コイル、補正コイルおよび補償ソレノイドをあわせて、55 台の超伝導電磁石で構成される非常に複雑なキーデバイスである。フェーズ 1 では、新たに導入した真空容器 (アンテチェンバー) の真空焼き、低エミッタンス調整、ビーム・バックグラウンドの研究などが主に行われた。フェーズ 1 終了後、約 2 年間の改造期間をかけて Belle II 測定器と QCS の設置を行った。しかしながら、最内層に設置されるピクセル崩壊点検出器 (PXD) は設置されず、そのかわりに Beast II と呼ばれるバックグラウンド検出器が設置された。この判断は賢明だったと思われる。なぜならば、KEKB 加速器時代にシリコン崩壊点検出器 (SVD) の最内層が最初の 2 ヶ月で損傷してしまったという苦い経験があるからだ。

まず、主リングの運転より先に、2018 年 2 月 8 日から陽電子ダンピングリングのコミッショニングが行われた。陽電子ダンピングリングは、フェーズ 2 になって新しく導入された周長 135 m の小型のリングで、その役割は LER へ入射する陽電子のエミッタンスを小さくすることである。主リングの物理口径および力学口径は狭いので、陽電子ダンピングリングは LER への入射には必要不可欠である。同様の理由により、入射電子ビームの低エミッタンス化を目指した RF 電子銃の開発と実用化は非常に長い時間をかけて行われた。つづいて、2018 年 3 月 19 日から 7 月 17 日までの 4 ヶ月間に SuperKEKB 加速器のフェーズ 2 コミッショニングが行われた。フェーズ 2 は、世界中のどこも試したことの無い本格的なナノビーム方式の手応えを試すパイロットランの役割を果

たす。現在、フェーズ 2 はすでに終了し、Belle II 測定器の改造を開始して、ピクセル崩壊点測定器を設置する作業を行なっているところである。フェーズ 3 は、2019 年 3 月から行われる予定であり、本格的な物理ランを行いながらルミノシティ向上を目指す。そこで本稿では、フェーズ 2 コミッショニングについて概要を述べたいと思う。

2 フェーズ 2 コミッショニングの戦略と目標

ナノビーム方式では、横幅が狭いビームを大角度の交差角をつけて衝突させる。図 1 に示すように 2 つの衝突するビームの重なり領域は、菱形に近い形状となり、ビームの進行方向の広がり、

$$\sigma_{z,eff} = \frac{\sigma_x^*}{\phi_x} \quad (1)$$

と書ける。ここで、 σ_x^* は、衝突点での水平ビームサイズ、 ϕ_x は、交差角の半分である。斜めに傾いた細長いビームを適当な座標変換を施すと、パンチ長が $\sigma_{z,eff}$ で水平ビームサイズが、

$$\sigma_{x,eff}^* = \sqrt{\sigma_x^{*2} + (\sigma_z \phi_x)^2} \simeq \sigma_z \phi_x \quad (2)$$

である仮想的なビームが正面衝突している描像と一致する。これらの 2 つの描像では、ルミノシティは同じである。したがって、ルミノシティを計算するときには、水平方向に幅が広く、非常に短いビームが衝突している”仮想ビーム” (effective beam) を用いる。

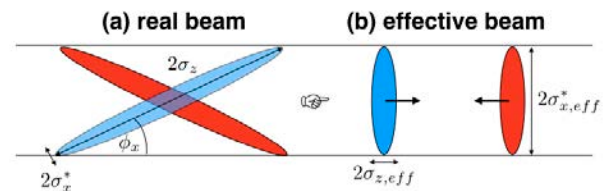


図 1: ナノビーム方式による衝突の様子。(a) 実際のビーム, (b) 射影した仮想的なビーム。

次に、砂時計効果について説明する。衝突点は、“点”であるのに対して、衝突するビームは進行方向に分布し、その標準偏差がパンチ長である。一方、衝突点を挟んで両側に設置された強力な凸レンズの働きをする 4 極磁石によって、ビームを絞り込むために、衝突点から離れるにしたがって横方向 (水平または垂直方向) のビームサイズ、つまり断面積は広がっていく。これは、カメラのレンズの被写界深度と同じ原理である。正面衝突や交差角の小さい従来の衝突方式では、ルミノシティは衝突領域の粒子密度に比例するので、パンチ長よりも被写

界深度が浅くなるように、衝突点でビームを絞り込んでいくとルミノシティの増加効率は下がっていく。なぜならば、衝突点から進行方向に同じ距離に位置する粒子同士だけが、いわゆる“衝突点”で衝突するが、そうでなければ衝突点から離れた場所で衝突するからである。衝突点から離れるにつれてビームサイズが広がる様子が砂時計に似ていることから、砂時計効果と呼んでいる。この砂時計効果の目安として、

$$\beta_y^* \geq \sigma_z \quad (3)$$

という条件が、従来の設計では課せられる。ここで、 β_y^* は衝突点における被写界深度を、 σ_z は実際のバンチ長を表す。従来の衝突方式では、2つの衝突するビームの重なり領域は、バンチ長の2倍にほぼ等しく、被写界深度をバンチ長に比べて小さく（浅く）するとピントがばやけてしまう。つまり、ルミノシティが上がらない。一方、ナノビーム方式では、前述した仮想的なビームを考えればよい。ビームの重なり領域は、実際のバンチ長の代わりに $\sigma_{z,eff}$ に置き換えられる。大きな交差角を持たせて、衝突点における水平ビームサイズが小さくできれば、 $\sigma_{z,eff}$ を小さくすることができるので、被写界深度を実際のバンチ長に比べて小さく（浅く）してもピントが合った状態を保つことができる。つまり、式 (3) は、ナノビーム方式では次のように変更される。

$$\beta_y^* \geq \sigma_{z,eff} = \frac{\sigma_z}{\Phi} \quad (4)$$

ここで、 Φ は Piwinski 角と呼ばれる量で、衝突点における実際の水平ビームサイズに対する仮想ビームサイズの比率として

$$\Phi = \frac{\sigma_{x,eff}^*}{\sigma_x^*} \quad (5)$$

と定義される。従来の衝突方式では、Piwinski 角は ~ 1 以下であるのに対して、ナノビーム方式では約 10~20 を想定している。したがって、実際のバンチ長が 6 mm である場合、300 μm まで β_y^* を絞ることが可能となる。Piwinski 角を大きくするためには、大きな交差角、小さなエミッタンス、水平方向の被写界深度である β_x^* を小さくする必要がある。フェーズ 2 では、Piwinski 角を約 10 程度まで大きくして衝突調整を行った。

従来の正面衝突とナノビーム方式を比較した場合、ビームビーム・パラメータを無視して考えると、たとえ砂時計効果があっても正面衝突の方が幾何学的にはルミノシティは高くなる。なぜならば、式 (2) にあるようにナノビーム方式では、衝突ビームのすれ違いによってロスする分が非常に大きいからである。SuperKEKB の最終的な設計パラメータで比較した場合、従来の正面衝突では、砂時計効果によって幾何学的には約 5 分の 1 に減少するが、ナノビーム方式では、Piwinski 角で示され

るように約 25 分の 1 となる。しかし、ビーム力学の観点からすると、従来の正面衝突では σ_x^* が非常に小さいために、後で述べるビームビーム・パラメータが大きくなりすぎて垂直方向のビームサイズが増大しルミノシティは上がらなくなる。また、シンクロ・ベータ共鳴が強くなって、ビームが不安定な状態になると予想される。一方、ナノビーム方式では、 σ_x^* をいくら小さくしてもビームビーム・パラメータが大きくなることはない。ただし、すれ違いによるルミノシティのロスは、垂直エミッタンスを小さくして取り戻す必要はある。

ナノビーム方式では進行方向における 2 つのビームの重なり領域が狭いために、物理事象の z 方向における崩壊点の分布に制限を与えることも特徴の一つである。例えば、従来の衝突方式である KEKB 加速器の場合、崩壊点の分布として σ が約 4.5 mm と Belle 測定器によって測定されているが、SuperKEKB 加速器の場合、Belle II 測定器によって、 σ で約 550 μm という値がフェーズ 2 では得られている。

ナノビーム方式において、ルミノシティは“仮想ビーム”を用いて、次のように表すことができる。

$$L = \frac{N_- N_+ n_b f_0}{4\pi \sigma_{x,eff}^* \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}} \simeq \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \quad (6)$$

ここで、 $N_{\pm}$ はバンチに含まれる電子または陽電子の粒子数、 n_b はバンチ数、 f_0 は周回周波数（SuperKEKB 加速器の場合、約 100 kHz）、 $\gamma_{\pm}$ はローレンツ因子、 ε_y は垂直エミッタンスであり、垂直方向のビームサイズは $\sigma_y^* = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}$ となる。ところで、垂直方向のビームビーム・パラメータは、

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e N_{\mp} \beta_y^*}{2\pi \gamma_{\pm} \sigma_{x,eff}^* \sigma_y^*} = \frac{r_e N_{\mp}}{2\pi \gamma_{\pm} \sigma_{x,eff}^*} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\varepsilon_y}} \quad (7)$$

と表せる。ここでは、電子と陽電子の垂直エミッタンスおよび衝突点における垂直ベータ関数は等しいという仮定を置いた。式 (6) から、 β_y^* を KEKB 加速器の 20 分の 1 まで小さくし、電流を 2 倍に増強すれば、KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを得ることができる。ただし、ビームビーム・パラメータ $\xi_{y\pm}$ は KEKB 加速器で得られた値と同等の値が要求される。式 (7) から、 β_y^* を小さくしていくと、 $\xi_{y\pm}$ は $\sqrt{\beta_y^*}$ に比例して小さくなるが、ルミノシティは、 $\sqrt{\beta_y^*}$ に反比例して増大する。垂直エミッタンス ε_y も、 β_y^* と同じ比率で小さくすることができれば、ビームビーム・パラメータ $\xi_{y\pm}$ は変わらずに、ルミノシティが、 β_y^* に反比例して増大する。したがって、垂直エミッタンスを、いかに小さくできるかが重要なポイントとなる。通常の電子および陽電子の円形加速器では、本来垂直方向に分散がないために垂直エミッタンスは非常に小さい。しかしながら、衝突型加速器に特有の測定器用ソレノイド磁場だけでなく、磁石設

置の位置および回転誤差や磁場誤差などのマシンエラーは垂直分散や x 方向の運動が y 方向に転化する XY 結合を作り出すので、垂直エミッタンスを生み出す。垂直分散や XY 結合を、できるだけ小さくするためには、マシンエラーの補正は必須である。また、バンチ内の粒子数を増やしていくと、ビームとビームが衝突時に集団的に相互作用し、垂直方向のビームサイズが大きくなることがある。これは、ビームビーム・ブローアップと呼ばれるもので、ビームビーム・パラメータを抑制する原因となる。ルミノシティを増やす道筋で、このビームビーム・ブローアップをどのようにして克服するのが問題となる。

フェーズ 2 コミッショニングにおける目標は、

1. ナノビーム方式の検証. β_y^* を 2 mm まで絞る. β_y^* をバンチ長よりも小さくしてもルミノシティが増大することを確認. ビームビーム・パラメータは、 $\xi_y > 0.03$ を目標とする. LER のビーム電流 1 A で $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を得ること.
2. Belle II 測定器に対するビームに起因するバックグラウンドの理解とその軽減.
3. 入射システムの確立.

である。

3 フェーズ 2 コミッショニング

フェーズ 2 を開始する前に、様々な問題が発生した。まず、衝突点最寄りのビーム位置モニターが設置されている真空チェンバーを衝突点チェンバーと接続する段階で、ベローズ内の RF フィンガー³が飛び出してしまい手で押し込んで修復したという事があった。フェーズ 2 終了後、開けて見ると RF フィンガーに放電跡が見つかった。Belle II 測定器内部に位置するベローズ・チェンバーの冷却水漏れ事故もあった。このとき、漏れた水が中央飛跡検出器にかかってしまった。穴が空いてしまったので、普通に冷却水を流すことができず、その対策として (1) 窒素ガスを流して温度を監視しながら空冷する, (2) 負圧循環システムを導入して水冷する, (3) 接着剤を流し込んで穴を塞ぐことが検討された。その時の結論は、まず (1) を行い、準備ができ次第 (2) に移行するというものであったが、結局、フェーズ 2 期間中に負圧循環システムを使用することはなかった。

上記で述べた問題の対策を施し、2018 年 3 月 19 日より、最初に HER からコミッショニングは開始された。QCS の設置誤差や磁石の磁場誤差を考慮して、アクセプタンスを広く取るために、HER の β_y^* を 81 mm と大

きくデチューンして閉軌道を探した。初めに、高周波加速空洞はオフして、ビームを周回させることを試みた。これは、加速位相が最初はわからないためである。ビームはエネルギー補給を受けなくても、運動量アクセプタンスが 1 % あれば、約 25 周する計算となる。QCS の磁場勾配は、もっとも大きいもので、70 T/m であり、磁場強度にすると 23 T となる。また、QCS の物理口径が小さいところは、HER の場合で 15 mm である。このように許容範囲が厳しく、QCS の設置誤差が約 100 μm よりも大きくずれると、軌道は大きく歪み、閉軌道を探すことは非常に難しくなる。入射ビームは、リング内の所要所に設置されているターン毎ビーム位置モニター (TbT BPM) で位置や強度が観測される。これを見ながら、水平・垂直方向のステアリング磁石を駆使して周回軌道を探した。最初の 1 周を見つけるのにかなり苦労したが、入射を始めて日付が変わる頃にビームは約 20 周するようになった。このことは、QCS の設置精度がかなり良かったことを示している。高周波加速空洞をオンして、加速位相の調整を行い 3 月 21 日早朝、HER に初めてビームを蓄積することができた。少ないビーム電流が蓄積できて軌道補正もある程度行ったが、ビームを積み増すことができないという問題が残った。入射ビームがリングに蓄積されるときに、蓄積ビームが蹴り出されてしまうということが判明し、HER 入射キッカー 6 台のうち 1 台しか働いていなかったことがわかった。HER 入射キッカー自体はフェーズ 1 では、すでに長期にわたる運転を行っており、初歩的なミスであるがゆえに特定するのに時間がかかった。このことは、ものごとの結果には必ず原因があるということを再確認させられた出来事であった。思い込みの恐ろしさも痛感した。さらに、HER と LER を合わせて 8 台ある QCS の垂直ステアリングのうち、QC1 (HER の L 側) を除いて他の極性が設計と異なっていたことも後に判明した。これは電源ケーブルの接続を変更するのではなく、データベースの方を改修して対処した。

HER につづいて、3 月 26 日から LER のコミッショニングが開始された。LER の閉軌道を探す手順は、HER と同様である。LER の β_y^* を 48.6 mm として、デチューンしたオプティクスから出発した。しかしながら、入射のタイミングを決めるイベント・システムが 1 Hz 入射に対応できていなかったため 26 日の LER 入射は諦め、手直しをして 27 日に入射調整を再開し、ビームを 1 周させることができた。3 月 28 日に、入射セプトラム下流のビームモニター電極で真空漏れが発生し、その対処で一時的に中断したが、3 月 30 日の深夜にビームを LER に初めて蓄積することができた。4 月に入ってから、QC2 (LER の L 側) の水平ステアリングと至 4 極補正コイルの電源ケーブル接続が入れ替わっていたことが判明し、接続の

³電磁場遮蔽用の薄い板。

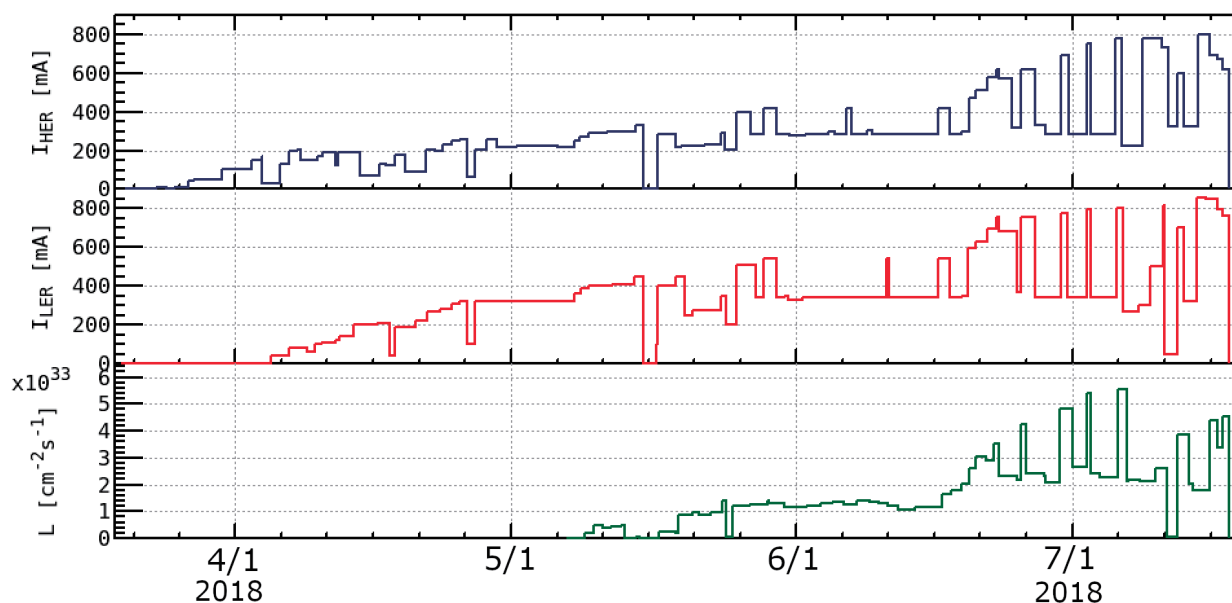


図 2: 日ごとの最高値, 上段:HER のビーム電流, 中段:LER のビーム電流, 下段:ルミノシティ。

修正を行った。クライオスタット外の接続ミスであったために致命的な問題とはならなかった。HER と LER の両方が正常に運転できるようになったのは、4 月の第 2 週になってからで、主リングの立ち上げに約 2 週間を要したことになる。立ち上げに 2 週間というのは計画通りで、1 リングあたり実質 2~3 日で蓄積までいけたのは、ある意味驚きであった。TbT BPM は強力であったことに加えて、加速器制御のしくみも KEKB 加速器時代と比べて格段に進歩している。KEKB 加速器時代においては、長期シャットダウン後の立ち上げで蓄積まで 1 週間かかったこともあったので、まるで夢のようである。図 2 に、フェーズ 2 における日ごとの最高電流および最高ルミノシティの履歴を示す。4 月 13 日まで、デチューンされたオブティクスで、バンチ毎フィードバックシステムやビーム位置モニターのゲインなど各ハードウェアの調整および補正と真空焼きを行った。真空焼きによって 100 Ah のビームドーズ量がルミノシティ・ランを行う前までに要求されていたが、初ハドロン観測前までのビームドーズ量は結局 40 Ah 程度であった。

いよいよ衝突点ベータ関数を絞る段階になって、いきなり 2 mm まで β_y^* を絞ることを予定していたが、QCS がクエンチするという問題に直面し、順次 β_y^* を 8 mm まで絞っていく作戦に変更を余儀なくされた。衝突点ベータ関数を絞る、ビーム入射および蓄積、オブティクス補正、ビーム入射という一連のサイクルを繰り返すわけであるが、QCS クエンチの危険性が高いのは、ベータ関数を絞った後、オブティクス補正前のビーム入射である。マシンエラーのある状態では、水平方向に振動した入射ビームが XY 結合により垂直方向に転化されベータatron 振動し、物理口径の小さな QCS でビームロス

を起こし超伝導状態が破れてクエンチする。後に、ビーム・バックグラウンドを低減する役割を果たす可動式コリメータを適切に使用することによって、入射による QCS クエンチは、ほぼ防ぐことができるようになった。

バンチ長よりも大きい β_y^* が 8 mm のパラメータが 4 月 13 日に HER、4 月 16 日に LER に設定され、衝突タイミングおよび衝突軌道の調整が行われた。衝突タイミングを合わせるためには、水平方向のビームビーム・キックを使う。最初は簡単に見つかると思っていたが、これを観測することに、かなり時間がかかり苦労した。というのも、衝突タイミングが、位相調整器の 180 度に近かったためにハードウェアの特性と QCS クエンチなどにより、衝突タイミングを見つけることに難航した。ついに、2018 年 4 月 25 日に水平方向のビームビーム・キックが観測された。同日中に、垂直方向のビームビーム・キックも観測された。つづいて、4 月 26 日午前 0 時 38 分に、初のハドロン事象を観測することができた。数々の難題をクリアーし、やっとスタートラインに立てたという気持ちで高揚したことを覚えている。その時のイベント・ディスプレイやコントロール・ルームの写真は、KEK のプレスキット [11] で見るできるので、興味のある方は参照されたい。また、広報の人たちとニコニコ動画で初ハドロン観測を中継したことも良い思い出である。ダウンゴの秋本さんから「初衝突はいつごろになりますか？」とフェーズ 2 が始まる 1ヶ月前に聞かれたときは、だいたい 4 月下旬ですかねと答えたが、そのとおりになった。しかも、4 月 29 日からカナダのバンクーバーで開催された加速器の国際会議である IPAC'18 のプレナリー講演での発表にちょうど間に合った。

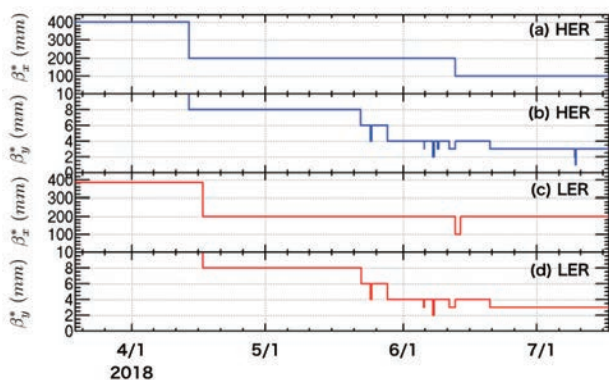


図 3: 衝突点ベータ関数を絞っていく履歴。

5月初めに Belle II 測定器でデータ収集が開始されると、ビーム進行方向 (z 方向) における崩壊点の位置情報が得られるようになった。これによると、どうやら衝突点が進行方向に 1 cm ほどずれていることが判明した。これを補正すると、ルミノシティは劇的に向上した。また、HER の水平軌道の衝突点における角度を調整すると、バックグラウンドが約半分に減って衝突点から離れた場所から飛来する粒子が減少した。これは、ビームが真空チェンバーに当たっていたものと考えられる。

5月中旬になって、ビーム電流を 200 mA から 300 mA 程度蓄積した状態でルミノシティ調整が本格化し始めた頃、HER において衝突点下流のステンレス製真空チェンバーが発熱し、真空漏れを引き起こした。QCS から発生する放射光が、衝突点下流 15~20 m にある真空チェンバーに当たったものと考えられる。垂直軌道を調整し、真空チェンバーを少し移動することによって対処した。フェーズ 3 までに、放射光マスクを 2 箇所を設置して放射光を防ぐ予定である。

5月下旬よりオプティクス補正とルミノシティ調整を交互に行いながら、 β_y^* を 8 mm から 3 mm まで順次絞っていった。図 3 に衝突点ベータ関数を絞っていった履歴を示す。ルミノシティ調整は β_y^* を 3 mm まで、試験的には、2 mm (HER は 1.5 mm) まで絞った。ここで達成された β_y^* は、実用的な衝突型加速器では世界最小である。mm スケールの β_y^* と言われても、加速器の、しかも衝突型加速器の専門家でなければピンとこないかもしれないが、世界でも数えるほどしかないのである。

β_y^* を 3 mm に設定した後は、6月中旬から7月中旬の運転終了まで、真空度と真空チェンバーの温度を監視しながらビーム電流を徐々に増やしていった。また、今年の梅雨明けが予想以上に早く、例年に比べて暑い夏となったことも、6月末から7月までの運転を、機器の冷却という意味で一層苦しいものとさせた。また、施設の老朽化によるクライストロン電源棟の雨漏りにも苦しめられた。

4 フェーズ2コミッショニングの到達点

フェーズ2における LER のビーム最高電流は 860 mA、HER においては 800 mA であった。これは、当初 LER のビーム電流 1 A を目指していたが、ベータ関数を絞ってルミノシティを向上させることを優先して調整時間を割り当てた結果である。6月中旬以降、大電流試験を時折行い上記で述べた最高電流に到達したが、LER で進行方向のビーム不安定性が約 850 mA から観測され、ビーム電流を増加することが難しくなった。この対策としてフェーズ3では、進行方向のバンチ毎フィードバックシステムを投入する予定である。フェーズ2におけるピーク・ルミノシティは $5.55 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で、狙ったわけではなく大電流試験中に記録された。というのは、大電流試験中は Touschek 寿命をなるべく長くするために LER の垂直エミッタンスを意図的に増大させて運転していたので、ルミノシティに最適化されたパラメータでのピーク・ルミノシティではないからである。

LER のビーム電流の最大値を 340 mA、HER を 285 mA に設定しバンチ数を 789 バンチとして、ルミノシティ・ランを本格的に開始したのは、ゴールデンウィーク明けの5月中旬になってからである。図4に日ごとの積分ルミノシティを示す。6月から7月中旬にかけての40日間におけるルミノシティ・ランの記録である。基本的に、日中と準夜は加速器調整およびスタディに費やされ、深夜0時から朝9時まではルミノシティ・ランに充てられた。この40日間に加速器が供給した積分ルミノシティは、 1853 pb^{-1} で、測定器が記録したのは 454 pb^{-1} であった。6月中旬まで効率は約 60 % あったが、ルミノシティが約2倍に向上してからは、記録された積分ルミノシティは横ばいで、効率が 20 % ~ 30 % に低下している。本格的な物理ランではないのだから気にするなと言われるかもしれないが、この原因を早急に調査すべきであると思う。

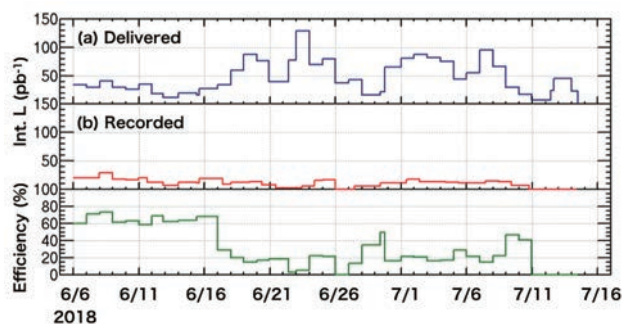


図 4: 積分ルミノシティの日ごとの履歴。上段: 加速器から供給された値, 中段: 測定器に記録された値, 下段: 記録された値の加速器供給に対する効率。

フェーズ2の期間中は、連続入射モードでのデータ収集は行わなかった(感触を得るための試験は行った)。したがって、ビーム電流を積み上げてはデータ収集を開始し、ビーム電流が低くなったらデータ収集を停止して再入射を行う前近代的な運転モードで、積分ルミノシティの効率は、連続入射モードよりも低下する。効率を上げるためだけでなく、ルミノシティ調整という観点からビーム電流はなるべく一定に保つ方が調整が容易になるので、フェーズ3では是非とも連続入射モードを確立したいと考えている。

4.1 ルミノシティ性能

スペシフィック・ルミノシティを次のように定義する。

$$\begin{aligned} L_{sp} &= \frac{L}{n_b I_{b+} I_{b-}} = \frac{1}{4\pi\sigma_z \phi_x e^2 f_0 \bar{\sigma}_y^*} \\ &= \frac{1.25 \times 10^{25}}{\bar{\sigma}_y^*} \quad [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{mA}^2] \quad (8) \end{aligned}$$

ここで、 $I_{b\pm}$ はバンチ電流である。一方、ルミノシティから逆算できる HER と LER の平均的な垂直ビームサイズは、

$$\bar{\sigma}_y^* = \frac{\sqrt{\sigma_{y+}^{*2} + \sigma_{y-}^{*2}}}{\sqrt{2}} = \sqrt{\beta_y^*} \sqrt{\frac{\varepsilon_{y+} + \varepsilon_{y-}}{2}} \quad (9)$$

と表される。スペシフィック・ルミノシティは、垂直ビームサイズにのみ依存し、ビーム電流によってサイズが変化しなければ一定となるものである。ここでは、LER と HER の β_y^* は同じ値である。図5は、スペシフィック・ルミノシティが β_y^* によって、どのように変化するかを示している。スペシフィック・ルミノシティは、少なくとも $1/\sqrt{\beta_y^*}$ に比例すべきものであり、 β_y^* とともに同じ比率で $\varepsilon_{y\pm}$ が、小さくなっていけば $1/\beta_y^*$ に比例する。大局的なオプティクス補正を施して、単一リングにおける垂直エミッタンスは十分に小さく 10~20 pm 程度まで到達しているにもかかわらず、 β_y^* をバンチ長より小さく絞ってもスペシフィック・ルミノシティが上らないという問題に直面した。図5を見ると、 β_y^* を 6 mm から 4 mm または 3 mm に小さくしても、スペシフィック・ルミノシティは横ばいで、 $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{mA}^2$ 程度を推移している。

はじめ何が起きているのか見当がつかなかったが、QCS の4極磁石が意図に反して、わずかに回転していると仮定すると説明できることがわかった。ハードウェアとしての誤差評価については、文献 [10] に詳細が述べられている。LER と HER、それぞれのリングにおいて、4台の4極磁石のうち衝突点を挟んで最も近い2台の QC1 磁石が、左右で同じ量だけ逆向きに回転している場合、QCS の外側では XY 結合による垂直ビームサイ

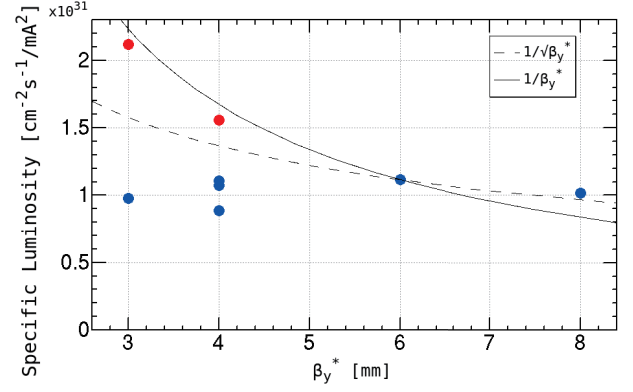


図5: スペシフィック・ルミノシティ。横軸は β_y^* 。青丸は、マシンエラーの補正前、赤丸は補正後。

ズの増加は観測されない。また、左右で異なる回転角の分は大局的なオプティクス補正によって XY 結合は補正されてしまうので、やはり同量の逆回転誤差が残る。これは、左右の QC1 の位相差が π に近いために起きる局所的な XY 結合で、QC1 で補正すべきものである。局所的な XY 結合とウエスト (衝突点におけるビームサイズの極小値) が設計場所と異なることによって、衝突点の垂直ビームサイズの2乗は次のように大きく見える。

$$\begin{aligned} \sigma_y^{*2} &= \mu^2 \varepsilon_y \left(\beta_y^* + \frac{\Delta s}{\beta_y^*} \right) + (\eta_y^* \sigma_\delta)^2 \\ &\quad + \frac{(r_2 + r_4 \Delta s)^2}{\beta_x^*} + \beta_x^* (r_1 + r_3 \Delta s)^2 \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、 $r_1 \sim r_4$ が XY 結合を表すパラメータで、 Δs はウエストのずれを表す。ちなみに、XY 結合が大きくなければ μ は、ほぼ 1 に近く $\mu^2 = 1 - (r_1 r_4 - r_2 r_3)$ 。 $r_1 \sim r_4$ と Δs が全て 0 となれば、垂直ビームサイズは本来の想定している値となる。なるべくビーム・ブローアップの生じない幾何学的に決まるルミノシティを測定するために、小さなバンチ電流で局所的な XY 結合の補正を行った。このためには、低い電流でもルミノシティの感度があるルミノシティ・モニターが必須である。なぜならば、衝突点における垂直ビームサイズは、ビーム軌道を垂直方向にスキャンして得られたルミノシティの値と軌道の変位によって推定する必要があるからである。フランスのオルセー・グループが開発した LumiBelle 2 と呼ばれるルミノシティ・モニターは感度がよく測定に適していた。これを使って、衝突点における垂直ビームサイズが最小となるように QC1 に設置されている歪4極コイルを用いて補正を行った。その結果、スペシフィック・ルミノシティは向上し、 $1/\beta_y^*$ の曲線にほぼ乗るようになった。

表1に、フェーズ2における典型的な3つの場合について主要なマシンパラメータを示す。高バンチ電流運転 (High bunch current)、ルミノシティ・ラン (Reference)、高ビーム電流運転 (High current) である。6月末までの

ルミノシティ・ランで、調整が進みスペシフィック・ルミノシティが向上していく様子を図6に示した。LERとHERのバンチ電流積にバンチ数を掛けたものを横軸としているので、式(8)より、ある一定のルミノシティの双曲線が等高線として同じ図に描かれる。高バンチ電流運転(7月3日)も図6に示されているが、これはバンチ電流を変えずにバンチ数だけを395から1576へと4倍に増やすと、LERの電流が約1Aとなるパラメータである。このとき得られたルミノシティをLERのビーム電流約1Aに外挿すると、 $9 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となり、ほぼ 10^{34} に近い。

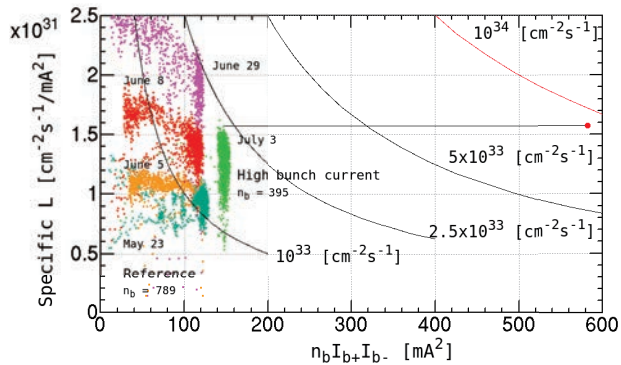


図6: スペシフィック・ルミノシティ。横軸はLERとHERのバンチ電流積にバンチ数を掛けたもの。ルミノシティの等高線も合わせて表示してある。

ルミノシティ・ランと高バンチ電流運転におけるスペシフィック・ルミノシティとバンチ電流積の関係を、図7に示した。これを見ると、非常に小さなバンチ電流では高いスペシフィック・ルミノシティが得られているが、急激に下がって、バンチ電流積が増加するとともにビームビーム・ブローアップによってスペシフィック・ルミノシティが徐々に下がっていく傾向にある。非常に小さなバンチ電流における σ_y^* は、単一ビームにおけるX線ビームサイズモニターによる観測とほぼ一致する。したがって、上で述べた線形なマシンエラーは、ある程度補正できていると思われる。スペシフィック・ルミノシティの低下傾向は、運動量のずれた領域にあらわれる非線形なマシン・エラーを入れるとある程度、粒子トラッキング・シミュレーションから説明できそうであるが、まだ完全に理解されておらず、今後の研究課題の一つである。垂直方向のビームビーム・パラメータもスペシフィック・ルミノシティと似た傾向にあり、バンチ電流が増加するにつれてビームビーム・パラメータも増加するが、あるバンチ電流から頭打ちになる傾向が見えている。フェーズ2で得られた垂直方向のビームビーム・パラメータは、0.021で目標の0.03には届いていないが、これもフェーズ3における課題であり、今後はビームビーム・ブローアップとの長い戦いがつづくことになる。

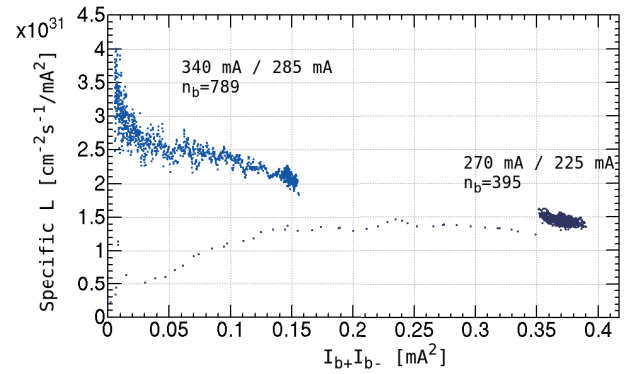


図7: スペシフィック・ルミノシティ。横軸はLERとHERのバンチ電流積。

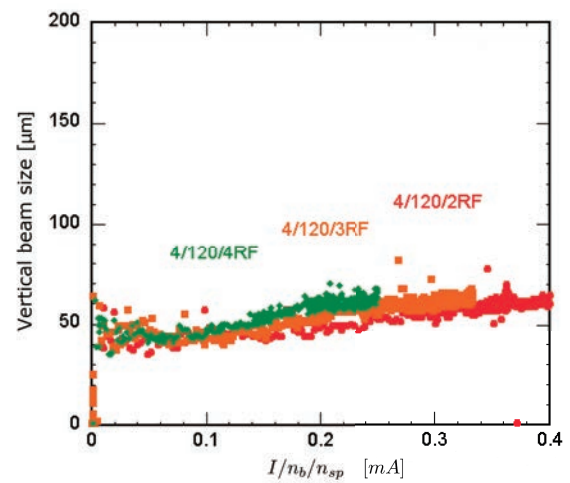


図8: LERにおける垂直方向のビームサイズ。横軸は、RFバケット間隔で規格化したバンチ電流。3つのフィルパターンが示されており、それぞれトレイン数/トレインあたりのバンチ数/RFバケット間隔が表示されており、RFバケット間隔によって差がないことがわかる。

4.2 電子雲効果

陽電子リングであるLERに特有な現象として、電子雲効果によって垂直方向のビームサイズがブローアップしてルミノシティを制限するというものがある。フェーズ1では、TiNコーティングされたアンテチェンバーに加えて永久磁石で構成されるソレノイド磁石をベローズ部に設置したが、RFバケット間隔あたりのバンチ電流が、0.2 mAのしきい値を超えるとビームサイズのブローアップが観測された。フェーズ1での電子雲観測をもとにフェーズ2では、電子雲対策の永久磁石が自由空間に設置された。図8に、RFバケット間隔で規格化したバンチ電流に対する垂直ビームサイズを示す。バンチ数はすべて480バンチである。バンチとバンチの間隔をRFバケット単位で、2RFバケット、3RFバケット、4RFバケットと変えながら、X線ビームサイズモニター

表 1: フェーズ 2 におけるマシン・パラメータ。比較のために、フェーズ 3 における最終的なパラメータも示す。 σ_y^* は、X 線ビームサイズモニターによって推定される衝突点における垂直ビームサイズ。 $\nu_{x,y}$ はベータトロン・チューン。

Symbol	Phase 2						Phase 3		Unit
	High bunch current		Reference		High current		Final		
	LER	HER	LER	HER	LER	HER	LER	HER	
I at L_{peak}	265	217	327	279	788	778	3600	2600	mA
n_b	395		789		1576		2500		
I/n_b	0.670	0.549	0.414	0.353	0.500	0.494	1.44	1.04	mA
ε_x	1.8	4.6	1.7	4.6	1.7	4.6	3.2	4.6	nm
β_x^*	200	100	200	100	200	100	32	25	mm
β_y^*	3	3	3	3	3	3	0.27	0.3	mm
σ_z	6						6	5	mm
$2\phi_x$	83								mrاد
Φ	13.1	11.6	13.5	11.6	13.5	11.6	24.6	19.4	
ν_x	44.562	45.542	44.558	45.541	44.561	45.545	44.53	45.53	
ν_y	46.617	43.609	46.615	43.610	46.614	43.612	46.57	43.57	
σ_y^*	883	652	692	486	1285	528	48	62	nm
$\bar{\sigma}_y^*$	797		552		879		55		nm
ξ_y	0.030	0.021	0.0277	0.0186	0.0244	0.0141	0.088	0.081	
L_{sp}	1.57×10^{31}		2.27×10^{31}		1.43×10^{31}		2.14×10^{32}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}/mA^2$
L	2.29×10^{33}		2.62×10^{33}		5.55×10^{33}		8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

で垂直ビームサイズを測定した。ブローアップが始まるとすれば、すべてのフィルパターンで同じしきい値で始まるが、0.4 mA の範囲まででは、ブローアップは観測されなかった。したがって、LER のビーム電流が 1 A で、1576 バンチ、3.06 の平均 RF バケット間隔の場合、電子雲効果によるブローアップは起こらないことがわかる。電子雲効果による垂直方向のビームサイズのしきい値はフェーズ 1 の約 2 倍となり、バンチ結合不安定性のモードも自由空間由来のものがなくなり成長率が減少したことも確認された。

5 フェーズ 2 であらわになった問題点

フェーズ 2 において超伝導磁石からなる最終収束システムを導入するにあたって QCS コイルがクエンチするという問題は、ある程度想定されていた。しかしながら、 β_y^* が 2 mm ないし 3 mm 程度で QCS クエンチが頻発するとは考えていなかった。 β_y^* を絞った直後は、オプティクスが乱れていて、入射すると入射ビームが QCS に当たってクエンチする危険度は非常に高くなる。しかしながら、オプティクス補正するには、ビームを入射して 50 mA 以上のビーム電流を安定に蓄積する必要がある。この鶏が先か卵が先かという問題に似た状況に、非常に頭を悩まされることとなった。

QCS にビームを当てないようにするためには、QCS の物理口径よりも小さな物理口径をリングのどこかの場所に作る必要がある。それを実現するためのハードウェアとしては、可動コリメータがある。可動コリメータは、Belle II 測定器のビーム・バックグラウンド低減のために設置されたものである。可動コリメータは、KEKB 加速器時代からの既存のものと SLAC の PEP II 加速器で使われた実績のあるコリメータをもとに制作した新型コリメータがある。既存のコリメータは片側のみのコリメータ・ヘッドであるが、新型では両側からコリメータ・ヘッドを独立に出し入れできる。LER については、すべて新型で水平コリメータが 4 台、垂直コリメータが 1 台設置されている。HER については、新型の水平コリメータが 2 台、垂直コリメータが 1 台設置されており、既存のコリメータも水平と垂直コリメータそれぞれで 8 台づつ設置されている。

図 9 に、1 日あたりの QCS クエンチ回数を示す。1 度 QCS クエンチを起こすと、ビーム運転を再開できるまでに約 2 時間程度の復旧を要する。4 月初旬まで QCS クエンチの回数が多いのは、デチューンされたオプティクスから衝突オプティクスへと β_y^* を絞るときの調整過程で、可動コリメータがほぼ全開であったためである。4 月中旬以降、可動コリメータを調整することにより QCS クエンチの頻度は減少したが、依然として発生した QCS

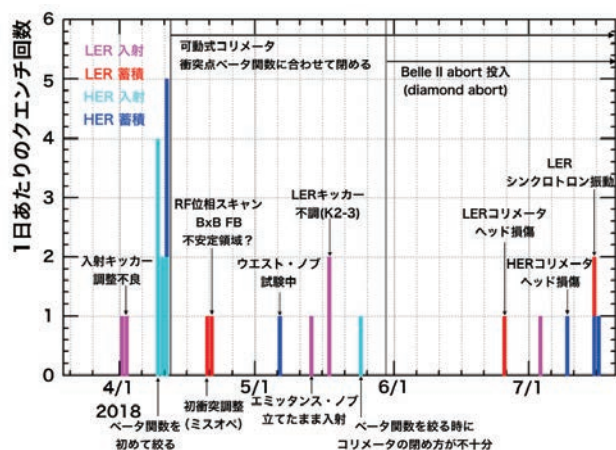


図 9: 1日あたりの QCS クエンチ回数。

クエンチは入射システムの不具合や人為的なミスによるものである。さらに5月末より、衝突点近くのダイヤモンド・センサーによる高速ビームアポート・システムを導入してから6月下旬までの約1ヶ月間は、 β_y^* を絞込み調整を行ったがQCS クエンチは起こらなかった。しかしながら、 β_y^* を3 mmに絞った後、6月末からビーム電流を600 mA以上に積み始めたところで、再びQCS クエンチが起こるようになった。ほとんどのQCS クエンチは、ビームを蓄積中であり原因が不明であった。外気温が30度を超える暑い日が続き、電源などの機器の冷却もきびしくスポットクーラーを使ったり建物のシャッターを開けて外気を取り入れるなど通常の運転では行わない対策をしなければならない時期であった。こうした理由により、必ずしもビーム運転が安定であるとは言えない印象があった。

このような6月末から7月中旬の運転終了にかけて発生したQCS クエンチの中には、可動コリメータのヘッドに損傷を負う事象がLERとHERそれぞれで発生した。損傷したコリメータは、いずれも約2 mmまで物理口径を狭めた新型の垂直コリメータである。これらの事象は、LERは約700 mA、HERは約750 mAのビーム電流を蓄積中に起こっており、大きな軌道変動やビーム不安定性は観測されていない。ただし、問題のコリメータ周辺の真空圧力が急激に高くなることが観測されたので、可動コリメータに異変があることがすぐさま疑われた。可動コリメータのヘッドに蓄積しているビームが当たって、エネルギーを損失したビームがQCSに飛び込んだものと考えられる。その結果、ビーム進行方向に沿ってヘッドに溝と棘ができてしまった。棘ができたために、入射ビームがベータトロン振動をすると棘に当たることがあり、大きなビーム・バックグラウンドの原因となった。こうしたコリメータ・ヘッドの損傷は、KEKB加速器時代にも経験したことがあった。今回は、まず様子を見るために局所的によけバンブ軌道を作って確認した後に、

可動コリメータを水平方向に約2 mm移動させて棘をビーム軌道からずらすことで対処した。また、メンテナンス日には、真空チェンバーに設けられた覗き窓からコリメータ・ヘッドを観察して溝と棘の確認を行った。可動コリメータのヘッドに蓄積しているビームが当たった原因は不明であるが、ダスト・トラッピングによるダスト粒子とビームが衝突して起こることが一つの候補として挙げられる。これは、真空のハネ（真空バースト）を伴う。フェーズ1では、この真空バーストを伴うビームアポートがかなりの頻度で発生した。このためフェーズ2が始まる前に、ノッカーと呼ばれるものでチェンバーに衝撃を与えてダスト粒子をあらかじめ落としておくという処置がなされた。これにより、ダスト粒子による真空バーストは、かなり減少したがダスト・トラッピングが可動コリメータ付近で発生した可能性はないとは言えない。コリメータ・ヘッドの損傷原因はフェーズ3においても継続的に追求される。QCS クエンチ対策として、フェーズ3前までに可動コリメータを追加で設置し、長期的な視野に立ってタングステン・シールドをQCSに組み込むことなどの検討が進められている。

測定器に対するバックグラウンドは、入射ビームによるものと蓄積ビームによるものに分けられる。入射ビームによるバックグラウンドは、コリメータ調整によって改善するところを見つけていることができるが長続きしないという印象であった。入射システムが時間的に変化していることや許容範囲がもともと狭いということが考えられる。入射ビームのエミッタンスが想定した値より大きくなればなるほどバックグラウンドを制御することが難しくなる。HERの入射ビームは、エミッタンスの小さいRF電子銃を使用することが望ましかったが、電子と陽電子ビームの同時入射が可能であるという理由によりエミッタンスの大きい熱電子銃を、定常的に使わざるを得なかった。これは、入射器上流部の初期設計によるもので、フェーズ3ではRF電子銃も同時入射に使えるようになる。熱電子銃でも、計算上問題ないはずであるが実際のところRF電子銃の方が入射バックグラウンドが少ないという印象があった。また、LER入射に関しても陽電子ダンピングリングによってエミッタンスは小さくなっているはずであるが、後につづく輸送路でエミッタンスが増大しているという観測結果がある。入射軌道や入射エネルギーなどはフィードバックしてはいるが、まだ押さえられていないパラメータがあるかもしれない。

蓄積ビームによるバックグラウンドは、真空圧力に依存する残留ガスとのクーロン散乱や制動輻射、バンチ内粒子散乱によるTouschek散乱、ルミノシティに依存する輻射Bhabha散乱などがある。また、ビームから放出された放射光が真空チェンバーの壁に反射して測定器に飛び込んでバックグラウンドとなる場合がある。

可動コリメータを使って、バックグラウンドを低減するわけであるが、LER には垂直コリメータが1台しかなく調整の自由度がないことが問題であった。また、バックグラウンドを低減すると物理口径が狭くなりすぎて、入射効率が下がるなど両立の難しさもある。内側の測定器のバックグラウンドは少ないのに、中央飛跡検出器の外側のレイヤーのリーク電流が増加してビーム電流を高く積めないという問題もあった。これはまだ結論が出ていない。ベータトロン・チューンとバックグラウンドに相関があることも分かった。これは、共鳴線近くで運転するとビームサイズが増大してバックグラウンドが増加すると考えられる。したがって、ベータトロン・チューンをフィードバックして注意深く管理する必要がある。フェーズ2で得られたバックグラウンドの詳細なデータ解析は現在進行中である。

6 終わりに

フェーズ2運転は、当初5ヶ月の予定であったが、様々なスケジュールの遅れや運転直前になってからの問題発生などにより4ヶ月の運転となってしまった。1ヶ月間短縮したコミッショニング計画の立案および実行には苦労した。数あるスタディ提案のうち、重要度の高いものから優先的に行われた。4ヶ月間といっても、暑い夏を避けるために6月末で通常終了するところを7月中旬まで延長して運転時間を確保した。梅雨明けが遅くなればいいと思いながらも、今年の夏は異常に早い梅雨明けで、しかも酷暑であった。したがって、大電流を積んで本格的にピーク・ルミノシティを目指そうとしたフェーズ2後半は、暑さとも戦わなければならなかった。初ハドロン事象を観測してから、ゴールデンウィークを挟んで1ヶ月も経たないうちに $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えるルミノシティに到達した。最適化されたルミノシティではないが、フェーズ2におけるルミノシティの最高値は $5.55 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。実際に、ルミノシティ調整に費やすことができたのは全体のうち約2ヶ月弱であった。この短い期間で、これまで述べてきた成果を得ることができたことは驚異的であったと思う。KEKB 加速器時代に蓄積された経験をもとに SuperKEKB 加速器のために何年もかけて加速器設計とビーム力学の検討を行い、加速器制御システムの高度化に努力してきた結果が具現化されたと思う。

KEKB アップグレード検討会「SuperKEKB(仮)」という名称で始まって以来、17年の歳月を経て、ようやくフェーズ2コミッショニングまで辿り着いた。2018年、我々はルミノシティという高い山の頂上を目指して歩き始めたばかりである。図6は、ある意味どのようにして山に登るかを示すガイドマップである。目標とする頂上

は遥かかなたで、まだ見えない。フェーズ2では、ナノビーム方式の検証を重点的に行なってきたが、やっと登山口から少し登ってベースキャンプを設営したところだろうか。フェーズ3からは高いルミノシティを目指して、頂上アタックを試みることになるが、ビームビーム・ブローアップとビーム・バックグラウンドとの長い戦いが続くことだろう。

謝辞

SuperKEKB 加速器フェーズ2コミッショニングの記録として、記事を執筆してみてもどうかと提案して下さった高エネルギーニュース編集委員のみなさんに感謝いたします。シニアな方々は時々書くとして、もっと若い人たちが自己アピールの場として高エネルギーニュースに記事をどしどし投稿して、活発な議論の場となることを願っています。

参考文献

- [1] SuperKEKB Task Force, “Letter of Intent for KEK Super B Factory”, KEK Report 2004-4, June 2004.
- [2] 飛山真理, “SuperKEKB 計画”, 高エネルギーニュース **27-4**, 236 (2009).
- [3] 小磯晴代, “The KEKB B-Factory”, 高エネルギーニュース **30-3**, 193 (2011).
- [4] 船越義裕, “KEKB の最近の性能向上について”, 高エネルギーニュース **28-2**, 193 (2009).
- [5] “SuperB Conceptual Design Report”, INFN/AE-07/2, SLAC-R-856, LAL 07-15, March 2007.
- [6] 飯嶋徹 他, “Belle II 実験”, 高エネルギーニュース **29-4**, 201 (2011).
- [7] 森田昭夫 他, “Belle 検出器の回転”, 高エネルギーニュース **32-2**, 68 (2013).
- [8] 飯田直子, “SuperKEKB 計画進捗状況”, 高エネルギーニュース **29-1**, 20 (2010).
- [9] 船越義裕, “SuperKEKB Phase 1 コミッショニング”, 高エネルギーニュース **35-2**, 102 (2016).
- [10] 大内徳人, “SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム (QCS) の建設”, 高エネルギーニュース **37-2**, 109 (2018).
- [11] <https://www.kek.jp/ja/imagearchive/2018/04/26/0700/>