

SuperKEKB 加速器世界最高ルミノシティまでの道のり

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

2020 年 (令和 2 年) 11 月 5 日

1 はじめに

SuperKEKB 加速器は、 $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを 2020 年 6 月 21 日に記録した。これは、KEKB の $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [1] ならびに LHC の $2.14 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [2] を超える世界最高ルミノシティである。世界最高ルミノシティといっても、SuperKEKB の最終目標からすると序の口である。なぜならば、最終目標は、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と、あと 33 倍必要だからである。最高ルミノシティの平均 80 % で物理実験が可能な場合、年間 6 か月運転を約 5 年つづければ 50 ab^{-1} の積分ルミノシティが達成できる計算である。衝突型加速器は、ルミノシティ性能で評価される。いきなり設計値が達成されることはまずない。アメリカ航空宇宙局 (NASA) による人類初の月への有人宇宙飛行計画であるアポロ計画にみられるように、SuperKEKB プロジェクトにおいても、多くの段階を経て目標に到達することを目指す。大まかな区分では、Phase 1, Phase 2, Phase 3 となるが、それぞれ目標が異なる。Phase 1 は、Belle II 測定器をロールインする前の調整運転で、アポロ 6 号までの無人ロケット打ち上げに相当する。ルミノシティ調整が始まる Phase 2 では、後で述べる「ナノビーム方式」の検証および $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えるルミノシティの達成、Phase 3 では、まず KEBK のルミノシティを超えること、それから徐々に性能を向上させて数年の間に設計ルミノシティに到達するというシナリオとなるが、そう簡単に思い通りにはいかないだろう。本稿では、ひとつのマイルストーンとして、世界最高ルミノシティまでの道のりを個人的な視点から重要なポイントに絞って書きたいと思う。

2 Phase 1

Phase 1 では、衝突点付近に最終収束システム (QCS)[3] および Belle II 測定器を組み込まず、かわりにバックグラウンド検出器 (Beast II)[4] を組み込んだ

試運転を、2016 年 2 月 1 日から 6 月 28 日の約 5 か月間に行った。Phase 1 の目的は、新規真空チェンバーの真空焼き、衝突点のない場合におけるビーム光学系の調整、バックグラウンドの測定 [5] であった。

SuperKEKB は、陽電子リング (LER, Low Energy Ring の略称) と電子リング (HER, High Energy Ring の略称) からなるダブルリング・コライダーである。ダブルリングにする理由は、陽電子のエネルギーは 4 GeV、電子のエネルギーは 7 GeV と非対称エネルギーであることと、多数のバンチ (ビーム粒子の集団) を蓄積しつつ、衝突点をひとつ (ふたつできるが、ひとつは立体交差にしてすり抜ける) にするためである。加速器中の粒子は、水が流れるように加速器中を一様に飛行するわけではない。飛行する粒子がバンチを形成しビームの進行方向に離散的なのは、リング内に設置された高周波加速空洞を通過するタイミングでしか加速されないからである。また、周回周波数の整数倍が高周波加速空洞の周波数となっていなければ粒子は周回できない。周長約 3 km (周回周波数約 100 kHz) の SuperKEKB 加速器の場合、509 MHz の高周波加速空洞を用いているので最大 5120 個のバンチを蓄積できる。

力学的安定領域の広い Phase 1 において、ビームの安定軌道を見つけて、ビーム電流を蓄積することは難しいことではない。しかしながら、衝突型加速器では、陽電子リングと電子リングの周長が全く同じでなければ衝突点が生じ、どんどんずれていくことになるので、ぴったり同じでなければならない。したがって、私の一番の気がかりな点は、LER と HER の周長の差が、1 ppm 以内に収まるかどうかであった。1 ppm というのは、LER に設置された周長補正用のシケインの可変範囲である。RF 周波数で、両リングの周長を変化させ最適値に調整し (周長は RF 周波数に反比例する)、両リングの周長の差は LER のシケインで吸収するのである。LER と HER の衝突点を含む約 300 m 区間の電磁石および真空チェンバーは新規入れ替え、かつ新しい位置に設置し直している。新

しい QCS, KEKB にはなかった新しい局所的な色収差¹補正のためのシケインの導入, Belle II 測定器の設置においては, 約 1400 t の測定器を水平面上で 25.95 mrad 回転させて新しいビームラインにフィットさせる [6] など, KEKB とは全く異なる設計となっているため LER と HER が同じ周長であるという保証はない。さらに, LER にいたっては, リング全周の主偏向磁石は新規作成かつ真空チェンバーも新しくアンテ・チェンバー²に作り直している。円型加速器の周長は偏向磁石の設置位置で決まる。これらの改造を施しているので, 周長を揃えるための電磁石の設置精度を確保するためには高度な測量およびアライメント技術を必要とする [7]。当然, SuperKEKB ではトンネル全体は見通せない。もし, 周長のずれが想定よりも大きければ, 電磁石を設置し直さなければならない。これは, 相当な作業量となり莫大な時間を必要とする。結論を言えば, 周長の実測値と予想値の違いは 1.9 mm で一致しており, LER と HER の相対的な周長の差は 0.2 mm で周長約 3 km において十分に 1 ppm の範囲内であった。

Phase 1 では, 低エミッタンス (垂直方向) の調整も真空焼き出しも順調にこなした。ここで, エミッタンスという言葉が出てきたが, ビームの広がりを表すパラメータ (水平方向と垂直方向がある) のひとつとと思っていた。後で説明するナノビーム方式では, 垂直エミッタンスは重要なパラメータである。SuperKEKB の真下の地盤は関東ローム層で軟弱なうえに, 地下水も通っているため電磁石は完全な水平面上にはないが大丈夫なのかという心配があった。最終的には, 垂直エミッタンスは約 10 pm を達成することができた。また, ビームと真空チェンバー内の残留ガスとの散乱によるバックグラウンドを低減するためには, 十分な真空焼きが必要であった。Phase 1 における積分ビームドーズ量は, LER で 780 Ah, HER で 660 Ah でほぼ目標を達成した。

3 Phase 2

Phase 2 からは, いよいよ Belle II 測定器がロールインされ, 最も内側にあるシリコン検出器 (SVD) とピクセル検出器 (VXD) はインストールされないが, ルミノシティ調整を行うマシン・スタディ中心の運転に入った [8]。目標は, VXD をインストールして本格的な物理ランを行う Phase 3 に進んでいかなければならないことである。リーズナブルなバックグラウンド状況下で, $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の実験ができるかどうかのポイントである。アポロ計画で言うと, アポロ 7 号の有人ロケット打ち上げにあたる。アポロ 1 号のような悲劇的な事故もなく, Phase 2 を予

定通り (最初の計画よりもずいぶん遅れたが) 迎えることができた。期間は, 2018 年 3 月 19 日から 7 月 17 日までの約 4 か月間である。その前の約 1 か月間は, 陽電子ダンピングリング (入射ビームのエミッタンスを小さくするための入射器に付属した小さなリング) のコミッショニングを行っている。Phase 2 からは, Belle II 測定器のコミッショニングと Phase 3 への移行の見極め, 可能ならば, 実験データ取得という任務が課せられていたので, Belle II グループからランコーディネーターが置かれた。初代ランコーディネーターは, 足立一郎さんが引き受けることとなった。詳細については, ランコーディネーター回想録を参照されたい [9]。一方, 加速器運転の責任者として, コミッショニング・リーダーを船越義裕さんが Phase 1 を担当し, Phase 2 からは, 私にバトンタッチされた。コミッショニング・リーダーは, ランコーディネーターと相談しながら加速器運転の目標を設定し, これを実現するための方針と計画を立案する。また, マシン・トラブルが起これば, 計画を変更し対処を検討する。そして, 加速器性能を向上させるために何が必要なのかを常に考える役割である。

朝 9 時から KCG ミーティング (SuperKEKB コミッショニング・ミーティング) が毎日休みなく開かれ, 朝から深夜午前 1 時ないし 2 時くらいまで加速器調整が行われた。コミッショニング・シフト 1 名とシフトリーダー 1 名という組み合わせに, BCG シフト 1 名が加速器コントロール室に滞在し, 筑波実験室に実験シフト 2 名が滞在する。KCG は SuperKEKB Commissioning Group, BCG は Belle II Commissioning Group の略。また, 業務委託の運転員 2 名が運転支援を行う。シフトおよび運転員は, 1 日 3 交代制である。これに, コミッショニング・リーダーと加速器スタディチーム, ならびにランコーディネーター, 副ランコーディネーターが加わる。加速器調整は深夜まで行われたが, さすがに加速器チームも休みが必要である。したがって, 加速器調整の後は夜明けまで, Belle II 測定器のコミッショニングの時間となる。「じゃ, あとはよろしく。」と言って, ランコーディネーターにお任せすることになるのだが, 今から思えば, つくづくランコーディネーターの役目は激務であったと思う。

3.1 ナノビーム方式

Phase 2 では, ナノビーム方式の検証が主目的であった。ナノビーム方式に致命的な欠陥が見つければ, 今後の計画に大きな支障をきたすことになる。ここで, ナノビーム方式を簡潔に説明したいと思う。図 1 に示すように, バンチの幅が狭いビームが大きな交差角を持って衝突する。垂直ビームサイズ (σ_y) は, 衝突点である真ん中

¹色収差は, カメラなどでレンズの中心からはなれた場所で像が歪む現象として知られる。これと似たことが加速器でも起こる。

²ビームと放射光の通り道が別れている真空パイプ

($z=0$) が一番小さく、後で説明するように衝突点から離れるに従って急速に大きくなる。ナノビーム方式の場合、2つの衝突するバンチの重なりあう部分のみで衝突するので、常に垂直ビームサイズが小さいところ（フォーカスされたところ）で衝突する。これを「ピントが合っている」と呼ぶ。

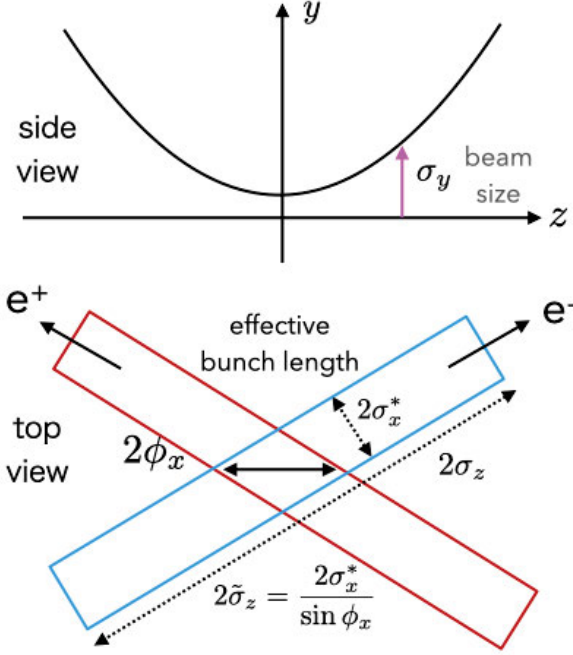


図 1: ナノビーム方式の模式図。上図は真横から見た図 (z - y 平面)、下図は真上から見た図 (z - x 平面)。

このピントの合ってる長さを、有効的なバンチ長と呼ぶ。有効的なバンチ長 ($\tilde{\sigma}_z$) は、衝突点における水平ビームサイズ (σ_x^*) と交差角の半分 (ϕ_x) を使って、

$$\tilde{\sigma}_z = \frac{\sigma_x^*}{\sin \phi_x} \quad (1)$$

と書けリアルなバンチ長 (σ_z) に依存しない。一方、バンチの幅が広かったり、交差角が小さい場合はどうなるだろうか。図から推察されるように、2つのバンチの重なる領域 ($2\tilde{\sigma}_z$) が増えるので、垂直ビームサイズの大きな場所（フォーカスのずれたところ）でも衝突することになる。これを、「ピンぼけ」と呼ぶことにする。重なる領域の長さは、ほぼリアルなバンチ長となる。この場合、ピンぼけしないためには、リアルなバンチ長を短くするしかない。もろもろな事情により、バンチ長を短くすることには限度があり、極端に小さくはできない。逆に言えば、バンチ長に見合った垂直ビームサイズがあって、そこまでしかビームを絞れないことを意味する。これを「砂時計効果」と呼び衝突型加速器業界では広く知られている常識である。しかし、ナノビーム方式では、先に述べたようにリアルなバンチ長を気にせずにビームを

絞ることができる。これが、ナノビーム方式の斬新かつ画期的な特徴である。図 1 に示すようにビーム軸進行方向の重なり領域が短いことがナノビーム方式の特徴であると同時に、物理事象においてプライマリー・バーテックスの位置も狭い領域に制限される。これは、物理解析時の崩壊モードを再構築する際にバックグラウンド事象と識別することに有効であると思われる。

ナノビーム方式におけるルミノシティは、

$$L = \frac{N_+ N_- n_b f_0}{2\pi \Sigma_x^* \Sigma_y^*} \quad (2)$$

ただし、 $N_{\pm}$ はバンチ内粒子数、 n_b はバンチ数、 f_0 は周回周波数、 $\pm$ は電荷の正負である。衝突ビームの水平方向の断面サイズは、両リングの二乗和の平方根をとって、

$$\begin{aligned} \Sigma_x^* &= \sqrt{\sigma_{x+}^{*2} + \sigma_{z+}^{*2} \tan^2 \phi_x + \sigma_{x-}^{*2} + \sigma_{z-}^{*2} \tan^2 \phi_x} \\ &\simeq \phi_x \sqrt{\sigma_{z+}^{*2} + \sigma_{z-}^{*2}} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。一方、垂直方向の断面サイズは、

$$\Sigma_y^* = \sqrt{\sigma_{y+}^{*2} + \sigma_{y-}^{*2}} \quad (4)$$

$$\sigma_{y\pm}^* = \sqrt{\varepsilon_{y\pm} \beta_{y\pm}^*} \quad (5)$$

で、エミッタンスとベータ関数の積の平方根で表現できる。 $\varepsilon_{y\pm}$ は垂直エミッタンスで、リングの場所によらない大局的な変数である。 $\beta_{y\pm}^*$ は、衝突点における垂直ベータ関数と呼ばれる。ちなみに、衝突点の水平ベータ関数を $\beta_{x\pm}^*$ と書くことにする。また、衝突点を挟んで両側に凸レンズを置いてビームを絞るので、 $\beta_{y\pm}^*$ は、衝突点での被写界深度つまり凸レンズでピントが合う範囲を表すパラメータとみなせる。つまりベータ関数を小さくすることは強い凸レンズでビームを絞ることに相当し、被写界深度が浅くなる。具体的にビーム進行方向に沿ったベータ関数の変化は

$$\beta_{y\pm}(z) = \beta_{y\pm}^* + \frac{z^2}{\beta_{y\pm}^*} \quad (6)$$

と書くことができる。 $\beta_{y\pm}^*$ を小さくすればするほど、 $\beta_{y\pm}(z)$ は衝突点から離れるにつれて 2 次関数的に急激に大きく変化する。ただし、ベータ関数はリングに沿った場所の関数で、 x 方向 (水平) と y 方向 (垂直) で独立な変数であるが、その場所の空間的な性質を示すものではないことに注意する必要がある。図 1 で示される衝突点近くの断面サイズの変化は

$$\sigma_{y\pm}(z) = \sqrt{\varepsilon_{y\pm} \beta_{y\pm}(z)} \quad (7)$$

となる。

はたして、ナノビーム方式に欠点はないのだろうか？図 1 をよく見ると、確かに重なり領域は小さいがバンチが進行方向に進んで完全にすれ違うまでを考えると、見

かけ上、パンチ長が短く幅が広いパンチが正面衝突しているようにも見える。このときのパンチ幅は、式 (3) で示されるように、実は非常に大きい。この幾何学的なロスを補填するために、垂直エミッタンスを小さくする必要がある。ナノビーム方式では、いかに垂直エミッタンスを小さくできるかがポイントとなる。Phase 1 で、垂直エミッタンスを重要課題のひとつとした理由が、ここにある。

3.2 初めてのビーム蓄積

Phase 2 を開始する前に、衝突点付近に様々なトラブルが重なり、これらの問題に対する対策が施されるまで、かなりの時間がかかった。結局、SuperKEKB メインリングの立ち上げは3月19日に決定された。初めてのビーム蓄積には、極度な緊張感があった。安定軌道を見つけてビームを蓄積するときに、衝突点のベータ関数を非常に大きな値に設定し（デチューンド・オブティクス）、マシンエラーの影響をなるべく低減するようにした。しかしながら、ビーム光学系の設計に思わぬミスがあったら、ビームは回らない。また、QCS の設置精度が想定外に悪かったら、やはりビームは回らない。QCS の設置精度は、 $100\ \mu\text{m}$ を想定していた。衝突点を挟んで左右のQCS クライオスタット内に、それぞれ4台の超電導4極磁石が格納されていて、中身は外側から見えない。さらに、Belle II ソレノイドによる電磁力を受けて磁石コイルの位置は変わる。衝突点付近のビームパイプを見たことがある人はわかると思うが、人差し指ほどの太さしかないのである。こんなところをビームを通すのかと思うと、直感的に恐ろしくなる。計算通りなら、大丈夫なはずなのだが。

HER の立ち上げを開始してから、3月21日早朝、初めてHER にビームが蓄積された。HER について、LER の立ち上げを、3月26日から始めて3月30日深夜、初めてLER にもビームが蓄積された。立ち上げからビーム蓄積までの過程は、後で判明した入射キッカーの絶不調（キッカー6台中1台しか正常に動作していなかった）やQCS 補正コイルの結線間違いなど、様々なトラブルがあり容易なものではなかった。今から思えば、この状態で、よくもビームを蓄積できたと思う。結局、HER と LER の両リングが正常に運転ができるようになったのは、様々なハードウェアの調整および補正を終えた4月の第2週になってからであった。

3.3 初めてのビーム衝突

ビーム衝突までに、ビームドーズ量で $100\ \text{Ah}$ の真空焼きが必要とされていたが、 $40\ \text{Ah}$ でビームを衝突点で

絞って衝突にチャレンジしようということになった。まず、デチューンド・オブティクスから衝突用オブティクスに変更する必要がある。ガバガバにでかい衝突点ベータ関数 (β_x^* , β_y^*) を絞るのである。絞ると、何が起こるかと言うと、極端に力学的な安定領域が減り、ビームを扱う許容範囲が狭まる。ちょっとしたミスも許されないのである。いきなり、 β_y^* を $2\ \text{mm}$ にしようとしたのが間違いであった。入射ビームがQCS に当たって、QCS クエンチが頻発するという問題に直面することとなり、とりあえず β_y^* を $8\ \text{mm}$ まで絞って様子を見ることになった。測定器に対してビーム由来のバックグラウンドを低減する可動式コリメータが、QCS クエンチを防いでくれるとわかったのは、後になってからである。 β_y^* が $8\ \text{mm}$ というのは、パンチ長 $6\ \text{mm}$ よりも長く、ナノビーム方式のメリットが生かされていないが、とりあえず衝突確認を優先することにした。4月13日にHER のオブティクス補正が終了し、4月16日にはLER も完了し準備が整った。しばらく、真空焼きを続行し、Belle II による初物理事象観測に向けて可動式コリメータの調整を行なった。これは、バックグラウンド・スタディの一環として行われた。バックグラウンド問題について Belle II と加速器の両方からアプローチする MDI クループというものが、Phase 1 から中心的な役割を担っていたのが、中山浩幸さんである。

次に行くことは衝突タイミングの調整である。これは、RF 位相をスキャンして、陽電子パンチと電子パンチが衝突点で衝突するタイミングを調整する。正しく衝突すれば、水平方向に大きなビーム・キックが観測されるはずである。ところが、何度スキャンを繰り返しても一向にもっともらしいビーム・キックを観測することができない。パンチの入れる候補は最大5120ある。陽電子と電子の相対的なパンチのずれは1パンチ以内にビーム位置モニター (BPM) のタイミング信号を見れば抑えられると思っていた。KEKB の場合は衝突点に陽電子パンチと電子パンチの両方が通過する BPM があったため、相対的な信号時間差を測定することは比較的容易であったと思う。今回は、独立に測定する必要があり、ケーブル長などの不定性がある。さらに、運の悪いことに非常に観測のしづらい、RF 位相で 180 度付近に衝突タイミングが見つかった。結局、4月20日から衝突タイミングのスキャンを開始して、4月24日に完了した。4月25日には、垂直方向の衝突点をローカルバンパ軌道で探索し、こちらは、すんなりと垂直方向のビーム・キックを観測することができた。これで、加速器側での初衝突に向けた準備は全て終了した。こうした一連の仕事は、KEKB の初衝突以来であるから、約20年ぶりということになる。衝突型加速器の運転感覚を取り戻すまでに多少時間がかかったことと、衝

突調整を少し軽く考えていたことを反省する次第である。あとは、Belle II のがんばりによるところとなる。4月25日水曜の夕方から LER を 60 mA, HER を 40 mA のビーム電流で初衝突観測を始めようということになった。翌日の4月26日は、2週間に一度行われる木曜メンテナンスの日で、メンテからの立ち上げには、まだ多くの時間を必要とした。今回を逃せば、初衝突散乱のハドロン事象を観測できるのは来週になるだろうと思われた。ニコニコ動画でのリアルタイム中継があり、多少のプレッシャーもあった。また、4月29日から開催される International Particle Accelerator Conference 2018 のプレナリートークの発表に、初衝突という成果を持って行けるかどうかのギリギリのタイミングであった。

加速器側は、衝突軌道を確保できれば、ビームを蓄積して、寿命によってある程度ビーム電流が減少したら再入射することの繰り返しである。大画面モニターのイベント・ディスプレイを眺めて、物理事象を待つだけである。しかし、各測定器の HV がちゃんとかかるか、トリガーの調整状況はどうかということを、ランコーディネーターの足立さんが非常に心配していたことは印象的であったし、実際、多くの指示を出していたと思う。宇野さんをはじめ多くの共同実験者も筑波実験室に詰めていた。ついに、4月26日午前0時38分初ハドロン事象を観測することができた。2010年6月末に KEKB が運転を終了して、約8年ぶりの物理事象である。運も良かったと思うが、加速器チームと測定器チームが一丸となって取り組んだ初めての大きな仕事であったと思う。

3.4 Phase 2 の成果と課題

Phase 2 での大きな成果は、 β_y^* を 8 mm から、6 mm, 4 mm, 3 mm へと段階的に絞ることに成功したことであろう。しかしながら、当初、 β_y^* を 4 mm まで絞っても、その効果がルミノシティに表れなかった。 β_y^* が 4 mm というのは十分にバンチ長よりも小さくナノビーム方式の利点が活かせる領域である。にもかかわらず、ルミノシティ性能は一向に向上しないのである。これは、「ナノビーム方式の欠陥だろうか」、と一瞬思ったが、よく調べてみるとビームビーム相互作用による垂直ビームサイズの増大として知られるビームビーム・ブローアップが起ころうとバンチ電流よりも、ずっと低いバンチ電流でルミノシティが想定値よりも小さいことがわかった。衝突点を挟んで、左側と右側の QCS がビーム軸のまわりに逆向きの回転をしているとすると衝突点に X-Y 結合が発生し、これが原因で幾何学的なルミノシティがないということが推測された。予想通り、この X-Y 結合を QCS のスキュー 4 極コイルで補正することによってルミノシティ性能は劇的に向上した。そして β_y^* を絞れ

ば、ルミノシティ性能は、ほぼ $1/\beta_y^*$ にスケールして向上していった。 β_y^* を絞る前後でビームビーム・パラメータを保持できたためである。ただし、バンチ電流が増加していくにつれて、ビームビーム・ブローアップは(2段階で生じることが)観測されていた。これを、どのように攻略していくかが次の課題となった。

実績のない β_y^* に初めて絞る時、QCS クエンチをどのように防ぐかが課題となっていた。これについては、いろいろな人が心配していたし、KEK 機構長から、直に「どうなのか」と聞かれたこともある。実際には、可動式コリメータの適切な口径設定やビーム由来のバックグラウンドの監視によって、入射ビームによる QCS クエンチを防ぐことは可能である。入射だけでなく蓄積ビームによるビームバックグラウンド低減についても可動式コリメータとビームロスモニターは重要な役割を果たした。LER の真空チェンバーを新規交換したことで、ビームと残留ガスとの散乱によるバックグラウンドが主流となっていた。可動式コリメータ調整のエキスパートとして田中秀治さんには、かなり助けてもらった。連続入射(トップアップ入射)も確立する前で、バックグラウンドが高くてビーム電流が最大 300 mA 程度しか積めず、ルミノシティは最大約 $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ での物理ランであったと思う。測定器に対するバックグラウンドが想定よりもかなり高かった。Belle II の稼働していない状態では、最高ルミノシティは、 $5.55 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であったが、これは高ビーム電流によるトレーニングのために、LER のビーム電流を 800 mA 近くまで蓄積していた状態であった。Belle II に HV がかかっていなければ、ルミノシティを出しても意味がないと考えるかも知れないが、加速器は家電製品のようにはいかないのである。まず、加速器単体でルミノシティがでなければ、Belle II を稼働させて実験データを取ることは到底不可能である。ルミノシティが出ることが確認されれば、どのようにしてバックグラウンドを抑え込み Belle II で実験データが取得できるかを考えればよい。しかし、Phase 2 では、 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の目標を達成することはできなかった。高バンチ電流試験(バンチ数を減らしてバンチ電流を高くするが全電流は下がる)では、バンチ数を4倍にすれば、ほぼ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に手が届くことは示されていた(バックグラウンドを無視すれば)。とは言っても、これらの材料より、ピクセル検出器を夏のシャットダウン中にインストールして、2019年春からの本格的な物理ランを始める Phase 3 へ移行するという判断は難しかったであろうと思う。ひとつ言えることは、何もやらなければ新しい知見は得られないということである。

4 Phase 3

Phase 3 からは、運転期間を西暦に abc という区分をつけた名称とすることに決まった。1 月から 3 月末までの運転を a, 4 月から 6 月末までを b, 10 月から 12 月までを c といったように、1 年を 3 つに分ける。特別な事情がない限り、年度末から年度初めは連続して運転するので、a/b と c の 2 期制となる。基本的に、a/b は 4 か月間、c は 2 か月間、1 年で合計 6 か月間の運転となる。

Phase 2 終了から約 8 か月間の長期シャットダウン期間を経て、いよいよ Phase 3 が始まった。シャットダウン期間中、Belle II にピクセル検出器がインストールされ、ほぼフル装備となった。測定器に対するビーム由来のバックグラウンドを低減するために、HER には水平方向の可動コリメータが 1 台、LER には水平方向の可動コリメータが 3 台、垂直方向の可動コリメータ 1 台が追加された。また、入射器において、HER 入射のための RF 電子銃が本格的に運用が開始された。RF 電子銃は、低エミッタンスの入射ビームを供給する。実は、入射器およびビーム輸送路の性能が SuperKEKB の性能向上に大きく影響する。質の良いビームを供給できれば、入射によるバックグラウンドが低減できるし、連続入射による高いビーム電流を維持できる。入射器とビーム輸送路のコミッショニングは、メインリングのコミッショニングと並行して行われ、膨大な苦労話があるのだが、ここでは割愛する。

4.1 2019a/b

2019 年 3 月 11 日から 7 月 1 日まで Phase 3 における最初のコミッショニングが行われた。立ち上げの要領は Phase 2 と同様である。HER の立ち上げを先行して行い、3 月 13 日に LER の立ち上げを開始した。Phase 3 開始前の 2 月 23 日に陽電子ダンピングリングの射出セプト電源の不具合が発生した。このために LER 入射が遅れそうになったが、不具合がなぜか解消されてしまったために、スケジュール通りに運転は開始された。文献 [9] に 1 週間遅れたという記述があるが、これは記憶違いだと思われる。ただし、加速器と Belle II の間でのコミュニケーション不足、電源メーカーへの対応の仕方などの不満と加速器施設の主幹や担当者への批判があったことが当時の打ち合わせメモからうかがわれる。Phase 3 に向けた念入りな準備（ドレス・リハーサル）を 1 月から始めていた Belle II からすれば、突然、開始が 1 週間以上遅れるかもしれないと聞かされれば、激怒するのも当然であろう。この不具合を追求しなかったために、秋の運転で再び悩まされることになるのだが。

Phase 3 の目標は、安定な物理ランを行い積分ルミノ

シティを稼ぐことであった。測定器のコミッショニングを中心に加速器調整を行う方針で、 10 fb^{-1} を目標とした。まず、真空焼きから始めて、その後に衝突点ベータ関数を絞って衝突調整を行う。 β_y^* を 8 mm に絞って物理ランを開始したのは、3 月 25 日である。ビーム電流を 300 mA まで蓄積させては減衰させながらの実験で、連続入射が確立されるのは、ずっと後のことである。4 月 1 日には、 β_y^* を Phase 2 の最終値である 3 mm まで絞ることができた。これから、順調に物理ランを始められると思っていた矢先に、4 月 3 日午後 9 時 45 分に入射器棟の Nextef(加速管組み立て室)で火災報知器が発報し、火災が確認されたためにメインリングの運転を停止した。火災の原因は、モジュレータ電源で使用されていたプラスチック筐体のコンデンサーが発熱焼損したことであった。このコンデンサーの使用期間は約 9 年で決して長いわけではないが、経年劣化の可能性が高く長期使用に耐えるだけの実績がなかったと言わざるを得ない。同様な事象が ATF でも過去に発生していたと聞くと、失敗からの学習が生かされなかったことが残念である。入射器ではプラスチック筐体のコンデンサーは使われておらずセラミック製である。現場への入域が許可されてすぐに見に行ったが、建屋内部は真っ黒い煤だらけで、Nextef と入射器本体とは防護壁で区切られていても、大量の煤が入射器の機器へ流入していた。また、煤に有害物質が含まれていることが判明したために、防護服、防護マスク着用での清掃、機器交換作業は過酷なものであった。入射器本体の火災ではなかったが、火災からの復旧に約 3 週間かかった。本来なら、復旧までに数か月かかると思われていたが、横断的な支援と多くの人々の努力と工夫により、4 月 25 日に運転を再開することができた。

ゴールデンウィーク中は、淡々と物理ランを行った。人員は少なく、何か問題が起これば「呼び出し」で対応せざるを得ない。ゴールデンウィーク明けから、連続入射の試験および調整を行うこととなった。連続入射が確立されれば、ビーム電流を一定に保つことができ、積分ルミノシティは著しく向上する。また、本格的なルミノシティ調整を安定して行うことができる。このビーム光学系では、LER のビーム寿命は 20 分程度と短いのでルミノシティ向上に連続入射は必須である。6 月 6 日に、LER のビーム電流 650 mA と HER のビーム電流 620 mA で、 $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティが物理ラン中に達成された。6 月下旬までに、積分ルミノシティで 6.5 fb^{-1} のデータ収集が行われた。但し、原因不明なビームロスがあり、QCS クエンチが発生した。これは「ダスト」が原因であると考えられているが確証があるわけではない。この時、ビームロスによる被曝でピクセル検出器の一部がダメージを受けた。より高速なビームアポート・システムの必要性が高まることとなった。最初の頃は QCS

をクエンチさせると随分暗い気持ちとなったが、ある程度なれてきていた。しかし、測定器へのダメージと聞くと青くなる。特に Belle II に対してであるが、「加速器の機器に対する安全システムを過信することなく、自らの身は自分自身で守ってください。」とは言い続けていたつもりであったがちゃんと伝わっていなかったのかも知れないと反省している。

2019a/b の最終週にマシン・スタディを集中して行うことになった。マシン・スタディ期間は、Belle II の HV を入れてデータ収集を行うことはしない。 β_y^* を 2 mm まで絞り、同時に β_x^* も 80 mm まで絞った。衝突点ベータ関数を絞ってからは、HER の QCS で発生した放射光がビームパイプに当たって、その反射光がピクセル検出器に飛び込むことが起こった。これは、加速器のパラメータの一つであるチューンがシンクロベータ共鳴線と呼ばれる不安定領域に近く、増大したビームハローからの放射光が原因であった。チューンを調整することによってピクセル検出器に当たる放射光を低減することができた。6 月 30 日に、約 700 mA のビーム電流で $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えるルミノシティを達成した。Belle II ではデータ収集は行っていないので非公式記録ではあるが、Belle II がロールインして 219 日後のことである。これは KEKB と比べると、約 5 分の 1 の日数である。2019a/b における最高ルミノシティは、LER のビーム電流 800 mA と HER のビーム電流 820 mA で $1.23 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを非公式ながら記録した。

4.2 2019c

Phase 3 が始まって、最初の運転期で $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えるルミノシティでなかなかデータ取得ができないという意味では、やはりマシン・スタディの時間を多くとって、秋の運転をルミノシティ向上を主目的とすることが妥当であろうということになった。2019c 秋の運転は、10 月 15 日から 12 月 12 日までの 57 日間という短い運転期間である。LER の D2 地区にある垂直方向の可動コリメータヘッドがビームとの衝突で損傷していたので、夏期シャットダウン中に交換したりと、夏のメンテナンスで真空を破った箇所があり、立ち上げの最初には真空焼き出しが必要である。10 月 19 日までに、デチューンド・オプティクスで 700 mA までビーム電流を蓄積して真空焼き出しを行うことができ、順調な立ち上がりに見えた。10 月 21 日に NEG ポンプ活性化を行い、リングの運転を再開しようとしたところ、陽電子ビーム輸送路にある 1 台の偏向磁石の上下コイル (N 極と S 極) の渡り接続部が加熱損傷し LER の運転が不可能となった。幸い予備機があり、交換可能な場所であった。それでも、電磁石の交換には 4 日間を要した。10 月 28 日から 10

月 29 日にかけて、 β_y^* を 2 mm まで絞り、2019a/b のビーム光学系を再現することができた。衝突調整後は物理ランを開始し、10 月 31 日までに可動コリメータを調整し、連続入射モードを確立した。物理ランでのルミノシティは、 $6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで向上していた。10 月 31 日のメンテナンス後の立ち上げで、陽電子ダンピングリングからビームを取り出す装置のひとつである出射セプタムの電源が異常をきたし LER へのビーム入射が不可能となった。このトラブルは、2019a/b の運転開始前と同様の症状で、原因を特定するには、多くの時間が必要であると思われた。また、連休中にもかかわらず、電源製作会社に対する出張修理依頼をしなければならなかった。このときの対応も春と同様、Belle II グループの方々には、随分とご心配をおかけした。対応についても、多くのことが水面下で行われており、その事実がランコーディネーターに伝わらずコミュニケーション不足であったと思う。復旧には 4 日間を要することとなったが、幸いにして春にはわからなかった原因が特定できて対策を施すことができた。この間に入射器の RF 電子銃のコンディショニング、HER のビーム光学補正など、できることを行った。

さて、2019c は、衝突点ベータ関数を絞ることに主眼が置かれていたわけであるが、運転が安定にできるようになってからは、 β_y^* を 1.5 mm, 1.2 mm, 1 mm と絞る試験と物理ランを行った。 β_x^* については、両リングともに 80 mm まで絞っていたが、HER にコヒーレント・ビームビーム (ヘッドテイル) 不安定性が現れたので、HER については、60 mm まで絞ることにした。 β_y^* に対する β_x^* の比率によって、この種の不安定性が起こることが知られている。最終的なマシンの性能は、物理ランでない状態では、 $1.88 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が達成された。ただし、物理ランでの最高ルミノシティは、 $1.14 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。このときのビーム電流は、LER は 467 mA, HER は 388 mA, バンチ数は 783 バンチである。この秋の運転で、 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の物理ランを行うことができるという自信を持つことができた。

4.3 2020a/b

「2020 年夏までに 100 fb^{-1} 以上のデータを蓄積すること」という目標が課せられていた。これは、SuperKEKB レビュー委員会からの助言である。また、できるだけ早く KEKB の最高ルミノシティを超えて、世界最高ルミノシティを達成したいという思いが、加速器チームと Belle II チームで湧き上がっていた。世界最高ルミノシティというのは、最初に述べた LHC の $2.14 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

Belle II のランコーディネーターは、2 年間勤められ

ていた足立さんから松岡広大さん（名古屋大学素粒子宇宙起源研究所）に交代となった。声の大きな足立さんと対照的に、松岡さんは物静かな印象を与える人であるが、強い信念を持って行動していることがうかがわれた。交代の準備期間はあったと思うが、いきなりの大役で慣れるまで大変だったと思う。さらに、2020a/b はコロナウイルス感染拡大の影響で、いつもと異なる運転形態を強いられることとなったことが難しい判断をしなければならない場面に拍車をかけた。

2020a/b が始まって間もない、3月13日にジョン フラナガンさんが亡くなったことは非常に悲しい出来事であった [10]。氏は、闘病しながら X 線ビームサイズモニター (XRM) を開発し運用を行っていた。XRM は、ビーム光学補正の出来具合を判断したり、衝突調整を行うためには必要不可欠なものであった。心からご冥福を祈りたいと思う。

4.4 クラブウエスト方式

クラブウエスト [11] の効能は、ウエストのずれた場所で衝突する粒子を極力減らすことである。ウエストとは、ビームの断面積の極小で粒子密度の最も高くなるビームライン進行方向の位置のことである。一般的に扁平ビームなので、ウエストでは垂直方向 (y 方向) のサイズが最も小さくなる。ビーム力学的には、ビームビーム相互作用に起因する共鳴線やビームテイルの抑制が期待される [12]。こうした検討が 2019c の運転と並行して冬のシャットダウンまでに行われた。

ナノビーム方式の場合、衝突点に

$$H_{cw} = -\frac{1}{2 \tan 2\phi_x} x^* p_y^{*2} \quad (8)$$

というハミルトニアンを作れば、水平方向の粒子位置に依存してウエストを変化させることができる。一方、衝突点に 6 極磁石が作るハミルトニアンは

$$H_{cw} = -\frac{K_2}{2} \beta_y^s \beta_y^* \sqrt{\frac{\beta_x^s}{\beta_x^*}} \cos \Delta\psi_x \sin^2 \Delta\psi_y x^* p_y^{*2} \quad (9)$$

となる。 $\beta_{x,y}^s$ は 6 極磁石の場所でのベータ関数である。したがって、6 極磁石と衝突点との位相差 $\Delta\psi_{x,y}$ 、6 極磁石におけるベータ関数と磁場 K_2 を調整することができれば、クラブウエストを実現させることができる [11]。 K_2 を調整することによって、クラブウエストを 0 % から 100 % まで効果を変化させることができ、これをクラブウエスト比率と定義する。図 2 に、クラブウエストの概念図を示す。

衝突点でリング内側の粒子は 6 極磁石（衝突点に近い）ではリング外側に位置するので、4 極成分により発散作用を受けてウエストは元の場所から変位に比例して遠ざ

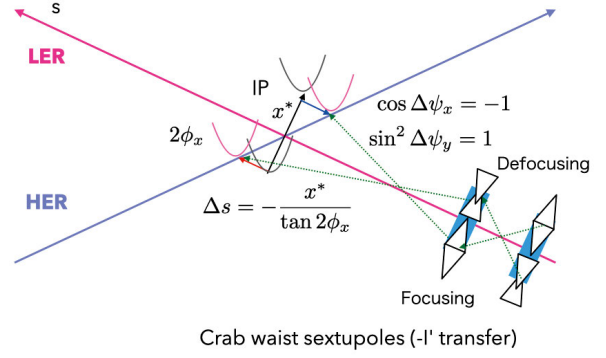


図 2: クラブウエストの概念図。クラブウエスト用 6 極磁石は、衝突点 (IP) を挟んで両側にある。

かり、完全なクラブウエストでは相手のビームライン上に移動する。逆に、衝突点でリング外側の粒子は収束作用を受けてウエストは元の場所から変位に比例して近づく。SuperKEKB 加速器では、クラブウエスト用 6 極磁石として、局所的色収差補正のための強い 6 極磁石を利用する [13]。垂直方向の局所的色収差補正は、衝突点の両側のそれぞれで、同じ磁場強度の 6 極磁石 2 台から構成され同一電源で制御されていたが、電源を独立化する改造を施し、磁場について互いに強弱関係をつける。こうすることによって、色収差を補正しつつクラブウエストを実現することができる。

しかしながら、クラブウエストには、力学口径が小さくなるという欠点が多粒子シミュレーションの結果から知られている。力学口径が小さい、つまり力学的に安定な領域が狭いとビーム寿命が短くなる。それだけ、高いビーム電流を保つことが難しくなる。

4.5 世界最高ルミノシティを目指して

2020a/b の運転は、2月25日から7月1日までの約 4 か月間である。立ち上げの様子は、これまでとほとんど変わらない。3月9日には、両リングともに β_y^* を 1 mm に絞ることができた。3月16日には、世界初となる本格的なクラブウエストを LER に導入した。LER におけるクラブウエストを導入するための改造は、冬のシャットダウン中に行われていた。まず、手始めに 40 % のクラブウエスト比から始めて、60 % に増加させてもビーム寿命が極端に短くなることは起こらず、ルミノシティ的に良い状態が達成されたので、HER にもクラブウエストを導入しようということになった。最終的に、LER は 80 % のクラブウエスト比を採用している。クラブウエストを行うためには、もともと 1 台の電源で 2 台の電磁石を給電していたものを、2 台の電源で 2 台の電磁石を給電するように改造する必要がある。ゴールデンウィーク前に、改造を施して HER でのクラブウエスト比を 40 % にし

てルミノシティ調整を行うことができた。

ゴールデンウィーク明けから、BCG は立ち上げ時を除いて、3号館からのリモート参加となった。コロナウイルス感染拡大による「非常事態宣言」が出された後である。加速器コントロール棟に人が、なかなか集まれなくなり、加速器運転が難しく感じるようになった。つまり、不測の事態に対するスピーディな対応がもはやできないのである。また、毎朝の KCG ミーティングへの参加もリモート接続推奨となった。国内外を問わず人の移動が制限され、Belle II 側も少数精鋭という体制を余儀なくされた。こうした難しい状況の中、Belle II の若手が、田中秀治さんの下で積極的に可動コリメータのチューニングを行ったり、バックグラウンドの解明に努力したりする姿が増えて心強いと感じることも確かであった。

5月後半には、LER のタウシェック寿命を伸ばすために、エミッタンスを 1.6 nm から 4.0 nm に大きくした。タウシェック寿命は、バンチ内粒子同士のメラエ散乱によりエネルギーが変化し安定領域から外れてビームロスすることで決まるビーム寿命である。エミッタンス、つまりビームサイズを大きくすれば、散乱頻度が小さくなりタウシェック寿命は伸びる。有効的なバンチ長は、水平ビームサイズに比例する、つまりエミッタンスの平方根に比例するので、これを大きくする場合、砂時計効果を気にする必要がある。実際のところ、4 nm 程度では 1 mm の β_y^* では影響は殆どないことが確かめられる。

また、X-Y 結合の色収差がルミノシティ性能に影響を及ぼしていると推測されていたので、LER において回転 6 極磁石による補正が試みられた。こうした非線形な領域における加速器の振る舞いは、SuperKEKB 加速器において未開拓な領域であり、今後、ビーム試験を継続し解明する努力が推し進められていくであろう。

2020a/b における最高ルミノシティは β_y^* が 1 mm のときに、 $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。これは物理ラン中に達成されたルミノシティであり、KEKB の $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ および LHC の $2.14 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超える世界最高ルミノシティである。このときのビーム電流は、LER で 712 mA、HER で 607 mA と KEBK と比較して約半分のビーム電流である。

6月最終週には、両リングの β_y^* を 800 μm まで絞ることに成功し物理ランを行っている。ちなみに、 β_x^* は 60 mm である。ついに、 β_y^* の値が、mm から μm の世界に突入した。海外の研究者に β_y^* について聞かれた時に、1 mm と答えると、驚きの表情と呆れた顔になるのが常であるが、800 μm といえば、さらに驚愕することであろう。LER のビーム電流が 536 mA、HER のビーム電流が 530 mA のときに $2.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティが達成されている。衝突点における垂直ビームサイズは、

224 nm で世界最小である。SuperKEKB 以前の世界最小値は SLC の 700 nm であった [14]。

β_y^* を 1 mm から 800 μm に絞った結果は、「絞ればスペシフィック・ルミノシティは上がる」というものであった。スペシフィック・ルミノシティは、

$$L_{sp} = \frac{L}{n_b I_{b+} I_{b-}} \propto \frac{1}{\Sigma_y^*} \quad (10)$$

で定義される。 $I_{b\pm}$ は、LER または HER のバンチ電流である。スペシフィック・ルミノシティは、幾何学的条件のみを考えると衝突点におけるビームサイズに反比例する。実際には、ビームビーム効果によるブローアップがバンチ電流を高くすると現れる。最後の 1 週間という短い時間での調整であったので、バンチ電流積の高い領域でのルミノシティの最適化は十分ではない。さらなる向上を 2020c に期待したいと思う。

5 おわりに

図 3 に、Phase 3 が始まって以降の SuperKEKB 加速器の運転履歴を示す。これまでに Belle II で蓄積された積分ルミノシティは約 74 fb^{-1} である。運転期間ごとのビーム電流を見ると、最高電流はほとんど増加していない。したがって、ルミノシティが向上してきた要因は、 β_y^* を絞ることによって、スペシフィック・ルミノシティを向上させてきたということである。 β_y^* を絞った場合、最初から高いルミノシティが実現できていたわけではなく、調整を少しずつ積み重ねた結果の値である。しかしながら、どのパラメータが、どの程度ルミノシティ向上に寄与しているのかを切り分けて説明することは非常に難しい。クラブウエストの導入、入射器の性能向上、可動コリメータ調整、ビーム光学系の補正等、合わせ技による到達点である。

ビームビーム・ブローアップがなければ、式 (2) に従って、 β_y^* を絞れば絞るほどルミノシティは上がる。しかしながら、物事はそう単純ではなく、実際にビームビーム・ブローアップは観測されている。 β_y^* を絞れば絞るほど、力学的安定領域は狭くなりビーム寿命は短くなる。ビーム寿命を補うだけのビームを供給する入射器性能が必要となってくる。寿命が短ければビームロス量も増え、Belle II 測定器に対するビーム由来のバックグラウンドが増加する。この短いビーム寿命を少しでも長くすること、バックグラウンドとビームビーム・ブローアップの抑制という長い戦いが続くことになる。

表 1 に運転期間ごとの物理ランにおける最高ルミノシティを示した。今まで、運転期ごとにルミノシティは倍増している。次も 2020a/b の 2 倍の $4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が、2020c の目標とされている（ルミノシティ倍増計画）。Belle II 測定器で粒子同定を行う TOP カウンターの放

放射線被曝量のリミットによってビーム電流が抑制されているので、現状では難しい状況である。これをなんとか克服して、次のステップである $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指したいと考えている。一桁上の $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 達成は、アポロ 11 号の月面着陸に相当するのではないだろうかと思っている。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, “Achievements of KEKB”, PTEP 2013 (2013) 03A001.
- [2] J. Wenninger and R. Giachino, “LHC Commissioning”, eeFACT2018, Sept. 2018.
- [3] 大内徳人, 高エネルギーニュース **37-2**, 109 (2018).
- [4] P. M. Lewis *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A, Vol 914, pp 66-144, 2019.
- [5] 船越義裕, 高エネルギーニュース **35-2**, 102 (2016).
- [6] 森田昭夫, 中村勇, 高エネルギーニュース **32-2**, 68 (2013).
- [7] M. Masuzawa *et al.*, M. Masuzawa *et al.*, in Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, paper THPOR005, 2016.
- [8] 大西幸喜, 高エネルギーニュース **37-3**, 139 (2018).
- [9] 足立一郎, 高エネルギーニュース **39-1**, 9 (2020).
- [10] <https://cerncourier.com/a/john-flanagan-1964-2020/>
- [11] “SuperB Conceptual Design Report”, INFN/AE-07/2, SLAC-R-856, LAL 07-15, March 2007.
- [12] M. Zobov *et al.*, Crab Waist Collision Studies for e^+e^- Factories, arXiv:0802.2667, Feb. 2008.
- [13] K. Oide *et al.*, “Beam Optics for FCC-ee Collider Ring”, Proceedings of the 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), Chicago, USA, Aug. 3-10, 2016.
- [14] R. Assmann *et al.*, “SLC- THE END GAME”, Proceedings of 7th European Conference, EPAC2000, Vienna, Austria, June 26-30, 2000.

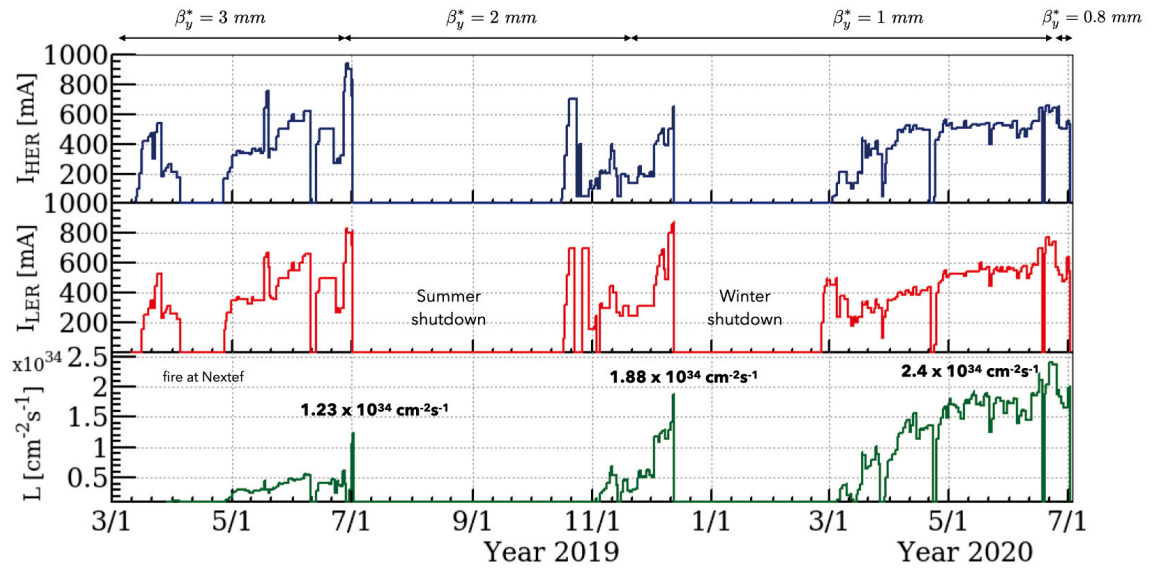


図 3: 2019 年春から 2020 年夏までの SuperKEK 加速器運転の履歴。1 日の HER の最高電流 (上段), LER の最高電流 (中段), 最高ルミノシティ (下段)。

表 1: 運転期間, 衝突点ベータ関数の最小値, ビーム電流の最大値, クラブウエスト比率, ピーク・ルミノシティ。ピーク・ルミノシティは物理ラン中に記録されたものである。この表において, ピーク・ルミノシティと $\beta_{x,y}^*$ および最大ビーム電流は対応していないことに注意。

	2018a/b	2019a/b	2019c	2020a/b	Unit
Date start	Mar. 19	Mar. 11	Oct. 15	Feb. 25	
Date end	Jul. 17	Jul. 1	Dec. 12	Jul. 1	
Period	120	91	57	127	days
β_x^*	200 / 100	80 / 80	80 / 60	60 / 60	mm
β_y^*	3 / 3	2 / 2	1 / 1	0.8 / 0.8	mm
I_{max}	860 / 800	940 / 840	880 / 700	770 / 660	mA
Crab Waist Ratio	0 / 0	0 / 0	0 / 0	80 / 40	%
$L_{peak} (\times 10^{34})$	0.26	0.55	1.14	2.40	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$