

新加速器衝突性能40倍をめざして

赤井 和憲 古川 和朗 飛山 真理
Akai Kazunori Furukawa Kazuro Tobiyama Makoto

1. はじめに

電子や陽電子等の粒子を加速し、衝突させる衝突型加速器の性能は、衝突事象の起こりやすさ、ルミノシティという値で表されます。ここで、興味のある物理現象が1秒間に起こる頻度をR、1個の粒子対（電子と陽電子とか）が衝突して物理事象を起こす反応断面積を σ （これは、素粒子の性質から決まっています）、ルミノシティをLとすると、 $R=L\sigma$ となり、Lが大きければ大きいほど、より多くの物理現象を観測できることとなります。反応断面積 σ には通常バーン（barn 10^{-24}cm^2 ）という単位が使われ、例えば興味のある反応断面積が1 nbarnであり、ルミノシティが $10^{33} \text{cm}^2\text{s}^{-1}$ であれば、1秒間に1回お目当ての物理現象が発生する、ということになります。1998年～2010年まで稼働していたKEKB加速器では、 $L=2.1 \times 10^{34} \text{cm}^2\text{s}^{-1}$ という、世界最高のルミノシティを達成していました。このKEKB加速器のルミノシティを、更に40倍に増加するよう設計され改造された加速器が、今年から本格稼働を開始したSuperKEKB加速器です。

ルミノシティを上げるためには、まずは衝突する密度を高くする、ということで、衝突点でのビームのサイズを絞り、特に鉛直方向のサイズを小さくする、ということが考えられます。しかしながら、大きく絞ると当然焦点の前後では逆にサイズが大きくなり、有限の長さがあるビームに対しては逆に悪影響の方が大きくなり、ルミノシティを上げるのは容易ではありません（この効果を砂時計効果、と言います）。これに対して、ビームの大きさ自体を小さくし（低エミッタンス化）、かつ水平方向にある程度角度を付けて衝突させる、という「ナノビー

ム衝突方式」が提案され、SuperKEKB加速器でも、この方式で衝突点のビームサイズを20分の1に下げることが目標にしています。更に、ビーム電流を2倍にすることで、合わせて40倍のルミノシティ増加を目指しています。このような大幅な性能を実現するためには、多くの挑戦的な技術開発が必要です。

SuperKEKB加速器の全体のイメージを図1に示します。KEKBの地下11mに周長約3kmのトンネルがあり、電子を蓄積する電子リング〔リングは円形加速器のことです〕（HER）と陽電子を蓄積する陽電子リング（LER）が設置されています。ビームは電子陽電子入射器によって作られ、輸送路を通じて各リングに入射されます。なお、陽電子ビームは、入射器の途中で陽電子ダンピング・リングに入射・蓄積し、低エミッタンスにして再び入射器に戻し、加速します。

本稿では、まずSuperKEKB加速器に高品位かつ大強度のビームを供給する入射器を紹介し、次に今年3月～7月まで行われたビーム衝突を含めた加

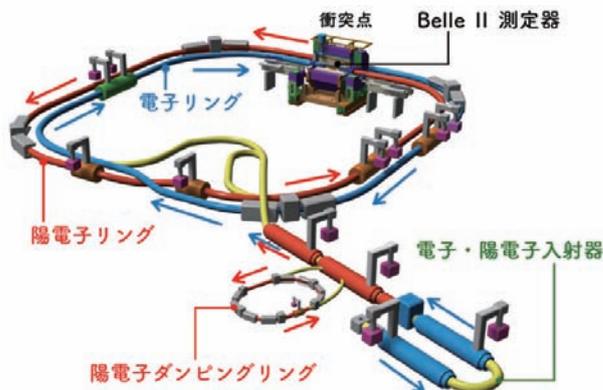


図1 SuperKEKB加速器の全体イメージ

速器調整（コミッショニング）の様子を紹介いたします。

2. 電子・陽電子入射器

電子と陽電子を作り出して衝突リングに入射する電子陽電子入射器においても、KEKB 実験が行われた頃に比べて高い衝突性能を達成するために大幅な改造が行われました。電子・陽電子は電荷量 4 nC (10^{10} 個ほど) で長さ数 ps の塊（ビーム）にして、1 秒間に 50 回加速・入射します。改造においては、粒子の数を約 4 倍増大させることと同時に、衝突を継続しながら効率の高い入射を行うために、ビームの拡がり（エミッタンス）を小さくする等、高品位のビームの生成に力が注がれました。

電子ビームは新しく開発された光陰極 RF 電子銃で生成します。電子を出しやすい合金を強力なレーザー光で短時間だけ照射し、発生した大量の電子をその場でマイクロ波により加速できるため、エミッタンスの良い電子ビームを作ることができます。その後、約 700 m にわたって設置された約 230 本の加速管を用いてエミッタンスが悪化しないように 70 億電子ボルト（7 GeV）まで加速します。加速管には大電力のマイクロ波を投入して強力な電場を作り、電子を波乗りのように加速します。加速管の他に、収束電磁石や偏向電磁石が約 300 台、ビームの測定装置が約 100 台、真空ポンプが約 200 台等さまざまな装置が配置されています（図 2）。加速管や収束電磁石が直線に並べられていないと、ビームがバナナのような形状に変化してエミッタンスが悪化し、入射できなくなるので、それらを 700 m にわたって 300 μm 以下の精度で正確に並べる必要があります。

電子の反物質である陽電子は、高エネルギー電子を重金属で融点が高いタングステンにぶつけることにより、制動放射と対生成という物理現象を利用して生成します。大量の電子をぶつける必要があるために、現在は光陰極 RF 電子銃の代わりに、熱電子銃と低い周波数のマイクロ波によるバンチング（塊形成）を利用しています。生成された陽電子はエミッタンスが悪く、そのままでは入射に使えないので、周長 130 m ほどのダンピング・リングと呼ばれる小型加速器に 40 ms 間周回させておくことで、エミッタンスを低下させます。その後電子ビームと同様に



図 2 入射器の典型的な部分における加速装置

40 億電子ボルト（4 GeV）まで加速します。

衝突の状況によって、効果的な電子と陽電子の入射頻度は変わります。また、同じ入射器から PF と PF-AR という 2 つの放射光実験施設にも電子を入射する必要があります。それぞれの実験効率を落とさずに、エネルギーも粒子数も異なる 4 種類のビームを入射するために、20 ms 間隔のパルス毎に異なるビームを加速・入射できるような用意をしています。さまざまな装置はパルス毎に動作を変えることができますが、装置により 10 ps ~ 1 ns の精度で同期した動作が必要なため、広域で高速同期動作が可能なイベント制御機構と呼ばれる仕組みを用います。1 つの入射器が 1 秒間に 50 回カメレオンのように変化して動作することになります（図 3）。

さまざまな加速装置も更新が行われており、大電力マイクロ波発生装置は 60 台使用されていますが、精度が高く、また自由度の高い加速を行うために、20 台が交換され、同時に小型化されました。また、パルス毎の動作変化も正確に管理するために、マイクロ波の測定装置も最新のデジタル計測技術を応用して一新され、より安定な入射に貢献すると期待されています。

電磁石についてもパルス毎に動作を変える必要があります。100 台以上の電磁石と電源が交換される予定で、既に 60 台以上が運用されています。新しい素子を利用する設計を慎重に適用することによって、大幅な費用削減と小型化、更に電力回収を実現することができています。

精度の高いビーム加速を行うためにさまざまビーム計測装置も更新され、ビーム位置モニタについて

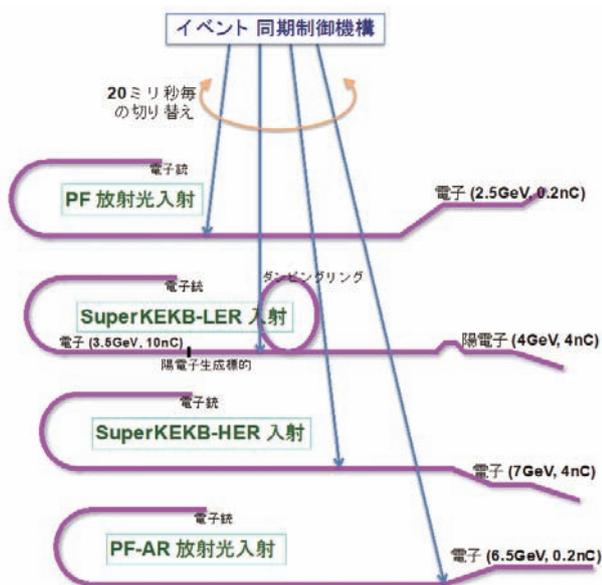


図3 1つの入射器が20ms毎に4つの役割を切り替えて動作します

は、パルス毎に数十倍異なる強度を持ち、場合によって96 ns 離れた2つの塊を持つビームパルスを、10 μm 以下の精度で測定することができるので、軌道やエネルギーの安定化フィードバック等への適用を期待しています。

これまでのフェーズ1やフェーズ2コミッショニングにおいては、首尾よくバランスの取れた入射を行うことができました。今後、性能が向上するに従って、精度の高いエミッタンスや塊の長さの測定も必要となります。また、少し高いエネルギーでの衝突実験も期待されていますが、30年以上使用した加速器が劣化により放電を起こすことがあるために、安定な運転が懸念されています。これらの装置の研究開発も継続することによって、より高い実験成果を達成できるような電子・陽電子ビームの入射を実現しようと考えています。

3. 衝突リング (HER/LER) のコミッショニング

SuperKEKB 加速器の性能を実現するためには、前身の KEKB 加速器の資産を最大限有効利用しましたが、やはり高度な性能を実現するため種々の改造が必要でした。LER では、低ビームサイズ実現のため円形軌道をつくる偏向電磁石を長くて磁場の低いものに交換、それに伴い真空チャンバーを、内

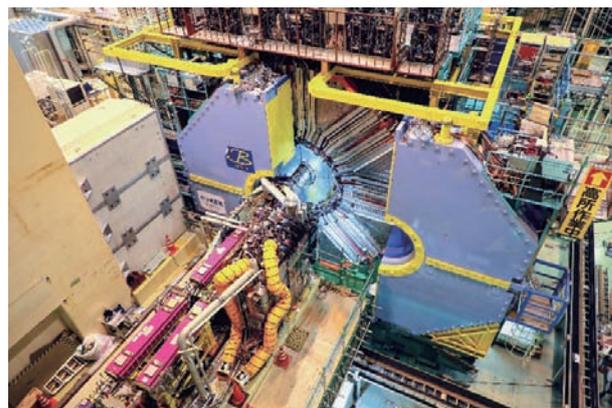


図4 建設中の Belle II 検出器と衝突点近傍

面に窒化チタンをコートすることで光電子不安定性抑制効果の高いアンテチェンバー構造のものにほぼすべて交換しました。また、衝突点付近 (図4) は、超伝導最終収束磁石 (QCS) や、強力な集束効果で発生するビーム色収差を補正する局所色収差補正区間の新設等、非常に大規模な組み替えが必要でした。東日本大震災で動いてしまったトンネル、磁石を測量し、磁石設置を精密に修正する作業も行われました。

改造後、まずフェーズ1として、2016年度に衝突点がない (単純に交差する) 形で運転開始し、目標の低エミッタンスが実現できていること、そしてある程度の大電流運転でハードウェアに問題が無いことを実証しました。その後、仮衝突点を解体、QCS 及び Belle II 検出器を衝突点に設置して、2018年の3月から7月まで、フェーズ2としての運転を行いました。

HER へのビーム入射は2018年3月中旬から、また LER へは4月から入射を開始し、それぞれビームの周回、ビーム蓄積を確認しました。この段階では衝突点は絞っておらず、また、衝突点付近で発生する色収差を補正するシステムも使用していませんでした。十分ビームが蓄積でき、それによりリングの真空状態も改善し、かつビーム光学的に十分に補正ができた4月中旬より衝突状態への調整が始まりました。当初、いきなり大胆にビームを絞った状態を色々試したものの、QCS にビームが突入することにより超伝導状態が破れてしまうクエンチ状態を幾度か引き起こしてしまい、また Belle II 検出器に入る不要なビーム由来ノイズも高い等、ビーム調整も困難を極めたため、慎重に段階的にビームを絞り、加速

器の状態、また検出器への影響を見極める戦略に転換しました。そこで、まずは衝突点鉛直方向のベータatron関数を8 mmまで絞り、低電流での衝突調整を開始しました。まずはビームの衝突タイミングを合わせるよう、LERビームのタイミングをずらしていき、タイミングが合う前後で相手のビームによって水平（及び鉛直）に蹴られる様子を観測しました。これは、ビームの位相（0~360°）だけでなく、ビームが入っているRFバケツ（高周波加速空洞の加速周期ごと=2 ns）のずれもあるので、容易ではありませんでしたが、粘り強く試行することで衝突タイミングを発見しました。この後、衝突点での水平、鉛直方向位置を一番よく衝突する様に調整し、Belle II 検出器の高圧等を上げてビーム衝突現象が観測できるのを待ちました。もちろん、Belle II 検出器側も、ビームからの現象を観測するのは初めてですので、衝突によって出てきた粒子を捕まえ、記録するためのトリガーの調整が必要で、加速器のコントロール室、そしてBelle IIのコントロール室双方、そしてニコニコ動画を通してごらんになっている全国各地の方達と共に粒子軌跡を示すイベントディスプレイを見ながら待つこと数時間、4月26日の早朝、ついに電子陽電子対から多数の粒子が飛び散る様子（ハドロン事象）を捕まえたデータが確認され、両コントロール室で待っていたスタッフ、共同研究者から大きな祝福の拍手がありました（図5）。

初衝突を確認したのは、衝突点鉛直方向のベータatron関数を（8 mm → 6 mm → 4 mm → 3 mm）と慎重に絞りながら、また蓄積電流を増やしながらルミノシティを上げるよう調整を続けました。この間、ビームサイズを絞ってもルミノシティが上がらない、あるいはBelle II 検出器へのバックグラウンドノイズが大きすぎて検出器を生かすことができない、あるいは周回するビームによりタングステンでできている真空中にあるビームコリメータが変形してしまう等の多くの困難に遭遇しましたが、1つずつ原因を調べ、実際のビームで検証することで問題を少しずつ解決していき、最終的にはフェーズ2運転でのとりあえずの目標の1,034/cm²/sには届かなかったものの、 5.5×10^{33} /cm²/sの最大ルミノシティを達成し、世界最初にナノビーム衝突方式が成立す



図5 初衝突時の加速器コントロール室の様子

ることを示しました。またBelle II 検出器に対しても、最大の懸念であったビームに1番近い最内層検出器に対するビーム由来のバックグラウンドが、少なくとも数年は耐えられるレベルまで低くできることが確認され、7月17日朝、フェーズ2実験は無事終了しました。

運転終了後、Belle II 検出器に最内層検出器をいれるためQCSを後退させ、今まで入っていたベリリウム製の衝突点用真空チェンバーを取り外す作業が行われました。今後、この衝突点チェンバーに最内層検出器（ピクセル検出器、シリコンバレット検出器）が取り付けられ、今年の12月には再びBelle II 検出器に挿入される予定です。その後、QCSを再び前進、またその付近の取り外してあった磁石や真空チェンバーの復帰を行い、来年3月には運転（フェーズ3運転）を再開する予定です。このフェーズ3では、Belle II 検出器はいよいよ本格的に物理データを蓄積開始しますので、加速器も更に性能を向上させ、所定の性能に近づけるよう調整、また改良を続けていく必要があります。衝突点ビームを絞れば絞るほどビーム光学的にも、加速器運轉的にも多くの困難な課題に直面すると予想されますが、あきらめず、粘り強く挑戦を続けていきたいと思っています。

（大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設）