

特集 1 KEKB B ファクトリー

KEKB の切り拓いたもの

生出 勝宣*

Pioneering Role of the KEKB B-Factory

Katsunobu OIDE*

Abstract

The KEKB B-factory experimentally verified the Kobayashi-Maskawa theory, and contributed to their 2008 Nobel Prize in Physics. KEKB has realized various innovative technologies to achieve the highest luminosity in the world. KEKB has opened up a new frontier of high-luminosity colliders.

1. 小林・益川理論の実証

KEKB と PEP-II の二つの B ファクトリーは B 中間子の崩壊過程における CP 非保存を発見し、それが小林・益川理論で説明できることを実証した。両氏の 2008 年のノーベル物理学賞の決め手は B ファクトリー実験であった。小林・益川理論は、弱い相互作用のゲージ理論により CP 非保存を説明するには、最低 3 世代・6 種類のクォークが必要である事を証明した。この理論が提唱された 1972 年当時はまだ 3 種類のクォークしか発見されておらず、6 種類ものクォークを想定することは非凡かつ大胆な着想であったと思う。その後実際、第三世代の b , t クォークが発見されたが、第三世代のクォークの存在だけではまだ小林・益川理論が実証されたとは言えない。極端な話、仮にトリスタンで t クォークが発見されていたとしても、小林・益川のノーベル賞にはならなかったかもしれない（もちろん t の発見自体がノーベル賞だったかもしれないし、もし t がそんなに軽いところにあれば B 中間子の寿命が短くなってしまい、B ファクトリー自体が成り立たなかったかもしれない）。要するに、小林・益川理論の実証には B ファクトリー実験が必須であり、これが B ファクトリーのこれまでの最大の成果でもある。特に KEKB の場合、日本の高エネルギー加速器実験が直接的にノーベル賞に結びついた最初の例となった。

2. 加速器の設計と性能上の諸問題

KEKB 加速器はいくつかの面で、それ以前の常識を超えた特長をもっている。当然のことながら、加速器は科学であり、どのような新しい方式でも、それが達成されてしまえば、誰でも理解できるところの当たり前のものに見えてしまう。KEKB においても今では当たり前だが、1990 年前後の設計開始段階ではいくつか議論を起こした問題や、創造力を必要とした問題があった。以下、その中から若干のものをピックアップして論じてみようと思う。なお、本誌の各論の項にある各専門家からの詳述と、重複や矛盾があるかもしれないが、ご容赦願いたい。また、分量と筆者の能力上、ここに触れられていない重要な課題も数多く存在するが、それらが以下述べるものより重要でない、と判断しているわけではない。

2.1 非対称エネルギー衝突

非対称エネルギーによる衝突実験は、1990 年当時でも別に新奇でも何でもなく、この点では特に大きな議論はなかったと思う。最近一部の記事に「KEK の研究者が非対称エネルギー衝突に最初拒否反応を示した云々」という記述を見かけるが、実際そのような反応を示した方がいたのかもしれないが、少なくとも加速器研究者の間では皆無に近かった。例えば固定標的実験は極端なエネルギー非対称衝突であり、HERA のような e - p 衝突も同様である。衝突時のビーム・ビーム効果でも、一方のビームが感じるのは相手のビームの作る電磁場であり、相手のビームのエネルギー

* 高エネルギー加速器研究機構
(E-mail: katsunobu.oide@kek.jp)

ギーそのものを感じるわけではない。

2.2 有限交差角

KEKB は衝突点で、両ビームが水平方向に $2\theta_x = 22$ mrad の有限交差角をもって衝突する。この角度はバンチの水平方向対角線の角度 $\sigma_x/\sigma_z \approx 17$ mrad と同程度の量である。歴史的にはこのような大角度の交差角は 1970 年代に DORIS で試みられたが、達成されたビーム・ビーム・パラメータは $\xi_y \sim 0.01$ 程度であり、失敗とみなされた。それ以来、有限交差角は危険とされ、実際 PEP-II では正面衝突方式が採用された。

これに対し、KEKB では最初から有限交差角方式を考えた。その利点は明らかである。交差角があれば、衝突前後で二つのビームを分離するために衝突点付近に強い偏向磁石 (PEP-II では永久磁石) を置く必要がない。したがって衝突点付近のコンポーネントは少数であり、その代わり detector solenoid を補償する compensation solenoid を置き、 x - y coupling の影響を大きく軽減できる。また、シンクロトロン放射の発生場所を衝突点から遠ざけることができ、detector へのバックグラウンドが少ない。また、本来の衝突点以外での寄生衝突の影響がほとんどないので、バンチ間隔を高周波バケット間隔まで詰められる (PEP-II では 2 バケット間隔が最短であり、それでも寄生衝突の影響が残る)。

このような利点を備えた有限交差角であるが、欠点は「シンクロトロン-ベータatron 結合」である。かつて DORIS が失敗したのもそのためであると言われており、KEKB の設計においても当然問題にされた。有限交差角があると、相手の及ぼすビーム・ビーム力の大きさが粒子の進行方向の位置 z に依存する事が、「シンクロトロン-ベータatron 結合」の起源である。しかし、一方でこのような「シンクロトロン-ベータatron 結合」というのは、実は正面衝突の場合にも存在する。それは、各粒子が相手のビーム・ビーム力を感じる進行方向の位置 s が、 z に依存するためである。力の作用点の進行方向のずれの影響は垂直方向に特に顕著で、それは垂直方向のベータatron 振動の位相のずれが z/β_y^* になり、バンチ長 σ_z と垂直方向の衝突点ベータ関数 β_y^* は同程度であるからである。このような「シンクロトロン-ベータatron 結合」はビーム・ビーム相互作用の本質に伴うものであり、正面衝突でも避けられない。実際、有限交差角の導入する「シンクロトロン-ベータatron 結合」の大きさをハミルトニアンで評価すると、上記の力の作用点のずれの項と、KEKB の場合はほぼ同じになる。つまり、有限交差角の導入する「シンクロトロン-ベ-

ータatron 結合」自体は元々の項と同程度の項を導入するだけであり、本質的に新たな現象を発生させるわけではない。

一般に「シンクロトロン-ベータatron 結合」のような効果はビームの 3 方向のチューンによって大きく変化する。つまり、よいチューンさえ選べば充分避ける事ができる。そこでビーム・ビーム効果を忠実に再現するシミュレーションが行われ、実際そのようなチューン領域が決して広大ではないが、実用上十分な大きさで存在する事が予想された。実際のオペレーションは一点で行うので、ある程度の領域があれば問題ない。ちなみにビーム・ビーム効果のシミュレーションであるが、KEKB の設計時に行われたのは一方のビームの形状を固定する weak-strong モデルであった。もちろん、実際には両方のビームが変形するので、strong-strong モデルでなければ完全ではない。しかし、strong-strong モデルでのシミュレーションは当時の計算機能力では信頼できる結果に到達するための十分な粒子数 ($\geq 10^6$) を回し、実用的な計算時間で結果を出す事はできなかったのも、やむを得ない状況であった。今日ではもちろん strong-strong モデルで計算可能であるが、KEKB の設計値程度のビーム・ビーム・パラメータ ($\xi_y \sim 0.05$) では両モデルに大きな差が無いことが知られている。

では、何故かつて DORIS において有限交差角がうまくいかなかったのか。その点について検討するため、当時 KEBB Accelerator Review Committee (KEKB-ARC) の議長であった G. Voss 氏のすすめに従い、DESY の A. Piwinski 氏を KEK に招いて議論やシミュレーションをおこなった。その結果 DORIS 当時はバンチ毎フィードバックによりビーム不安定性を抑える技術はなく、代わりにバンチ毎にチューンの違いをあえて作っており、そのため全バンチが最適のチューンにいることはできなかったことがわかった。また、交差角で高いルミノシティを期待できる共鳴線付近 (水平方向交差の場合は半整数共鳴線付近、 $0.5 < \nu_x \leq 0.52$) に接近できなかったことなどが判明した。KEKB では両条件ともクリアできるので、また、仮にこのような推定が失敗してもクラブ交差により実質正面衝突を回復できる、という構想があったので、結局 KEBB-ARC は有限交差角を了承した。

ところで話は前後するが、KEKB の設計が有限交差角に絞られる以前に、よくありがちな段階論的な発想で、 $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度のルミノシティを目標に、バンチ間隔を伸ばして正面衝突をやろうということで、PEP-II と同様な永久磁石の開発が試みられた

事がある．結果的には試作された磁石は実用可能域には達しなかったもので，その方向は放棄されたが，仮に永久磁石の開発に成功していたら正面衝突論が勢いついて，低いルミノシティ目標で開始するハメになっていたかもしれない．そうなるとはたして PEP-II との競争をどこまで勝ち抜けたかは不明であったろう．

実際の有限交差角の衝突の結果を正面衝突と比べると，バンチ電流積あたりのルミノシティを見ても，有限交差角の KEKB の方が正面衝突の PEP-II よりも 2 倍も高い．有限交差角のもたらした利点が例えば補償ソレノイドの設置，より小さな β^* ，より良い x-y カップリングなどを可能にし，総合的にルミノシティにとって正しい選択であったことを証明した．

さらに設計段階では充分意識されてはいなかったが，正面衝突方式にはより重要な問題が，実際の実験の過程で明らかになった．それは，衝突点付近に強い磁石があると，衝突時の粒子-粒子の Bremsstrahlung (radiative Bhabha) によりエネルギーを失った粒子がその強い磁場で急激に曲げられ，detector に飛び込んでしまうことである．このプロセスは素過程であり，単純にルミノシティだけに比例して発生するもので，技術的に防止できるものではない．この結果，BaBar の detector バックグラウンドではルミノシティに比例する成分が支配的になってしまった．一方 Belle では，バックグラウンドにルミノシティに比例する成分は全く見られず，有限交差角の威力がまさに発揮されたと言える．

有限交差角はその後 DAΦNE, LHC, BEPC-II などでも採用され，また将来の衝突型加速器では必須の方式として確立している．これはまさに KEKB の切り拓いたものである．

2.3 TRISTAN

もしも TRISTAN というものが KEK になかったら，KEKB はどうなっていたらだろうか．もちろん，TRISTAN の経験が生んだ豊富な人材や高周波や電磁石，入射器などの装置が KEKB に投入されたことが KEKB の成功をもたらしたことは言うまでもない．ただ，ここで取り上げたいのは TRISTAN のトンネルである．TRISTAN はビームエネルギー 30 GeV，周長 3 km のリングであるが，普通に考えれば KEKB-HER の 8 GeV には大きすぎるように思うだろう．実際，KEKB の設計のある段階では周長 1,400 m 程度の新リングを考えていたことがある．当時は必要最低限の機能だけならその程度で済むと思われていた．しかし，幸か不幸か，そのような新トンネルの建設費が結構高いことがわかり，ある段階で新トンネ

ル案は消滅した．もし TRISTAN がなければ，あるいは建設費が妙に安かったりした場合は，そのような新トンネル案が残ってしまい，短いトンネルが後々命取りになったであろうことは疑いない．一見 TRISTAN のトンネルは長過ぎるようであるが，その余裕のおかげで KEKB は 2.5π セルラティス，局所色収差補正，世界最長のウィグラーセクション等々の性能を支える数々の工夫と柔軟性を備えることができたのである．

TRISTAN のトンネルは元々陽子リングを追加する事を想定したため，アーク部の横幅は KEKB の両リングを横に並べるのに丁度いい．また，直線部は spin rotator を組み込むため縦横とも巨大である．KEKB の両リングは水平に並ぶため，むだな上下の偏向が少なく，垂直方向のエミッタンスの増大が避けられる．実際，PEP-II の垂直方向エミッタンスは上下分離の磁石が制限になっていることを考えると大きな利点である．直線部の巨大さは ARES 空洞やクラブ空洞を収容するうえで充分であり，もし最初に小さなトンネルが仮定されていたら，果たして ARES が採用されたか，という問題があるだろう．

もちろん，TRISTAN の全てが KEKB に最適であるわけではない．例えば TRISTAN のアークは完全な 4 分円弧ではなく，中央に短い直線部が挟まれており，TRISTAN ではそこにエミッタンス増大用ウィグラーが置かれていた．KEKB ではこの部分はラティスの複雑さを増すだけで，効用はいまのところはない．また，かつて測定器があった Nikko, Oho の中央架橋部もまだ有効には利用されていない，などの比較的小さな問題がある．

いずれにしろ，TRISTAN の巨大なトンネルが KEKB にもたらした利益は当初想像したよりもはるかに大きい．最近，イタリア・ロシア・SLAC の人達が SuperB 計画を考えているが，どうも 1,800 m 程度の短いトンネルにおさめようとしているようだ．確かに，最初の設計段階で必要なものだけを集めるとその程度で済むのかもしれない．しかし，その短さが後々性能発揮の制約になることを危惧する．

また，これは日本だけの現象かどうかかわからないが，とにかく加速器の装置や電源などを「小型化」することを妙に売り物にする傾向がある．もちろん小型化は結構だが，単に小型化にこだわっても，その加速器全体の総合的な性能を考えないと意味をなしていない場合がある．加速器本体は小さくても電源は巨大だったり，装置間の距離を縮めすぎて余分な干渉を起こしたり，わずかな周長の伸びにこだわるあまり，必要な

装置を組み込めなかったりするの愚の骨頂である。TRISTAN の巨大なトンネルが KEBB にとって数々の利点をもたらしたことを思うと、むやみに大きさを恐れるべきではなく、大きいものを作る方が総合的にはかえって安上がり、という場合もあることを認識したい。

2.4 ラティス

KEKB のアーク部のラティスは「 2.5π セル構造」と呼ばれる、きわめて特殊なものである。その特長は、

- 基本は 90 度の FODO5 セルに偏向磁石 4 台を配置した周期構造。
- セル当たり、水平・垂直各方向 2 台ずつの六極対を重ねあわないように置き、対の間の転送行列を $-I$ 変換（実際には R_{21} と R_{43} はゼロでない “ $-I$ ” 変換）で結ぶ。
- さらに 1 セル当たり 2 台の補助的 4 極を置いて柔軟性を高める。

というものである。その結果、このラティスは以下のようないくつかの利点を備える。

- 六極の持つ横方向非線形性はほとんどキャンセルされる。実測でも $\sim 10\sigma_x$ 程度のベータトロロン振動に対し、非線形性によるコヒーレント振動の減衰率は放射減衰（4,000 周）の $1/10$ であり、KEKB リングが高い線形性を持っている事がわかっている。
- LER リング全体で 54（HER は 52）ファミリーの六極対があり、それらは色収差補正のみを考えて調整できる。その結果、十分な dynamic aperture が確保されている。
- Momentum compaction factor と水平方向エミッタンスを一定範囲で独立に変更できる。Negative momentum compaction も可能である。
- 六極対に水平・垂直の対称・反対称バンパ軌道を立てたり、六極を水平・垂直にムーヴァで動かす事により、 x - y カップリング、dispersion、ベータ関数をほぼ独立に補正・発生できる。この方法で、垂直方向エミッタンスをある範囲で自由に調節できる。

このように、数々の利点を備えるセル構造であり、例えば放射光や ILC のダンピング・リングなどへも十分応用する利点はあると思われるが、どういうわけか、わずかにミュオンコライダーリングの設計などはあるものの、他に応用された例は知らない。

ちなみに、六極間の $-I$ 変換であるが、提唱されたのはかなり古い。また、不十分ながら SLC の ARC や final focus には用いられた。完全に non-inter-

leaved な六極対としたのは FFTB が最初かもしれない。KEKB 以前に実際にリングに用いた例はおそらくない。これは六極対がまばらになるため、色収差補正に多数のファミリー数を要し、計算機モデルなしには設計がむずかしかったためであろう。世の中では色収差補正や dynamic aperture の問題を、変位や運動量のずれの Taylor 展開をもとに考えるのが常道とされている。しかし、例えば KEBB のようにある種の極限性能に迫ろうとすると、Taylor 展開では収束が悪いし、現実の事態をうまく表現できないことが多い。そこで KEBB の設計で用いたのは何種類もの有限振幅の軌道に対して光学系を最適化する、という方法である。少なくとも計算機上ではこの方が最適解に容易にたどりつく。

さて、衝突点、特に LER では Toucheck 寿命を伸ばすため、HER よりも大きな dynamic aperture を必要とする。そこで、衝突点の両側に特別の「局所色収差補正」セクションを置き、衝突点の垂直方向の色収差がアーク部に伝搬しないようにした。これにより dynamic aperture はさらに拡大し、実際には設計値以上に β_y^* を絞りを、衝突時 $v_x \sim 0.505$ 程度まで半整数共鳴に接近する余力ができ、電子雲不安定性による LER 電流の制約のもとでルミノシティを設計値以上に伸ばす原動力のひとつとなった。局所色補正の光学系は FFTB 型のものであるが、これに対し、イタリアの研究者からは一時、「それでは本当の局所色収差補正ではない、六極と最終収束四極を同じ場所に置かなければダメだ」と批判を受けた事がある。しかし、後者の方式では必然的に dispersion が衝突点に漏れることになり、ビーム・ビーム相互作用にマイナスになる、と思っていたところ、どういうわけか最近のイタリアの設計は FFTB 型に戻っており、やはり FFTB 型の何らかの優位性を認めたのだと思う。この点、ILC の最終収束系は永らく非 FFTB 型であるが、本当に問題がないかどうか、筆者は具体的な根拠はないが、ひそかに疑っている。

2.5 入射器

KEKB の運転が開始される前、SLAC の G. Loew 氏は「PEP-II と KEBB の勝負は最後は入射器の勝負になるので、KEKB が勝てるわけがない」と述べられたという。確かに、入射器、特に陽電子の生成・入射能力では KEK のリニアックは SLAC にはかなわない（表 1）。これは現在でも変わらない。

つまり、SLAC では SLC の遺産により、より多くの、より良質の陽電子を、より頻繁に PEP-II に供給できるので、リングのルミノシティが高くなった場

表 1 KEK と SLAC の陽電子入射能力の比較 (1999 年当時)

	KEK	SLAC	
パルス当たり粒子数	0.4	2	10^{10}
繰り返し	50	<120	Hz
規格化エミッタンス	10^4	0.3	mm
電子との切り替え	5	0 (同時入射)	min.

合、陽電子の補給合戦になり PEP-II が勝つ、というのが G. Loew 氏の予想であった。

しかし、実際に起こったことはその予想とは全然違っていた。最大のポイントはビーム入射中も detector がデータ収集を続ける「連続入射モード」である。これは放射光の世界では top-up と呼ばれ、2000 年頃から実用化されていたが、高エネルギー実験では KEKB と PEP-II が 2004 年からほぼ同時に実用化に成功したものである。「連続入射モード」ではビーム寿命で減衰した分だけビームを補給するだけでいいので、KEK においても入射器の能力を全部使う必要がない。陽電子でも 10 Hz 入射で間に合う。すると SLAC との入射器の差は全然効いてこない。もちろん、ビームがアボートし、ゼロから蓄積する場合に入射器の差は出るが、そのそも KEKB の方が ARES 空洞や超伝導空洞のおかげでビームが PEP-II よりもはるかに安定である。一日あたりのアボート数では KEKB は PEP-II の 1/4 以下である。したがって、ゼロから積み上げる場合の差もあまり効いてこない。

更に入射器では一つの SLED パルスの立ち上がり立ち下りの両方に陽電子バンチをのせる、2 バンチ加速にも成功し、パルス当たりの電荷量も当初の 2 倍になり、SLAC との差を縮めた。また、電子・陽電子の切り替え時間も暫時短縮し、最近では 2 秒まで縮められたが、この 4 月からは 20 ms (パルス毎切り替え) に移行する事が予定されている。

以上のように、KEK の入射器は SLAC に対するハンディを見事に克服し、KEKB がピーク性能・積分性能の両面で世界一を走り続けることに貢献した。この点で、入射器グループとリンググループの設計・立ち上げ時からの密接な連携が大きな役割を果たしたことは間違いない。入射器グループは単にビームを供給すればよしとせず、ルミノシティ向上のための積極的な改善を次々に行ってきた。また、リンググループもリニアックのビーム診断調整をリニアックと一体となっていて行っている。そのためにリングとリニアックの主制御室を最初から統一して出発したのも多いに役立つ

た。

2.6 大電流の蓄積

もとより大電流の蓄積自身は KEKB の目標ではないし、実際 KEKB の蓄積電流は PEP-II などよりも低い。また、例えば ISR や KEK の陽子ブースターなどは KEKB よりも高い電流を加速・蓄積した。しかし、陽子リングと違い、電子・陽電子リングではシンクロトロン放射や短いバンチ長に伴う高次モード電磁場 (HOM) の発生があり、陽子ビームとは全然違う困難が伴う。その点では KEKB の蓄積電流 LER 2.0 A, HER 1.4 A は大部分の放射光リングよりは高いし、PEP-II (3 A/1.5 A) と比べてもバンチが短い (6 mm 対 12 mm) ことから、HOM の問題はより深刻かもしれない。

さて、大電流の蓄積でまず問題になるのは加速空洞とビームパイプの設計である。このそれぞれにおいて、KEKB と PEP-II は異なる戦略を選んだ。加速空洞においては、KEKB は空洞の電磁場の蓄積エネルギーを巨大化する ARES 常伝導空洞 (LER/HER) と超伝導空洞 (HER) を選択し、PEP-II はより通常に近い HOM 減衰空洞を選んだ。その際、トンネルの大きさなどの外部要因が影響したであろうことは既に述べた。両者の大きな違いは、KEKB の空洞では大電流の蓄積時の基本モードの detuning の量が小さく、それに起因する進行方向不安定性が放射減衰よりも弱くできるが、PEP-II では空洞・クライストロン・バンチ毎進行方向フィードバックを組み合わせた安定化システムが必須になることである。もちろん、PEP-II のシステムのほうが、所謂ハイテクであり、実際動作しないわけではない。しかし、一日あたりの加速システムに起因するビームアボートの数は PEP-II の方が KEKB よりもはるかに多かった。一方 KEKB においては、進行方向のフィードバックはごく単純な低次モードに対して行っているだけで、進行方向のバンチ毎フィードバックは使わずともビームは安定である。結果的には得られた性能においては KEKB の加速空洞に軍配を上げざるをえないだろう。

ちなみに、ARES 空洞と超伝導空洞を比較すると、基本モードの不安定性に対する許容度においては ARES 空洞の方が有利である。だから、KEKB においては HER も全部 ARES 空洞にしてしまう、という解があり、確かに、論理的にはその方がより単純な設計と言えたかもしれない。しかし、「TRISTAN で築かれた KEK の超伝導加速技術を育成・温存することは KEK の方針である」という、技術論を超えた判断をおこなって、超伝導空洞も使う事にした。また、

超伝導空洞の方が加速電圧を稼ぐのが容易であり、ARES 空洞の台数があまり増えるのは、コスト高になるという事情もあったと思う。

一方ビームパイプは KEKB が両リングとも単純な銅チェンバーであるのに対し、PEP-II は HER が KEKB に近い銅チェンバー、LER はアルミ製アンテチェンバー付きである。この LER のチェンバーの違いが電子雲の発生の違いを生み、1999-2000 年頃、PEP-II がルミノシティで先行する事態を招いた。

もとより電子雲の発生は PF で実験的・理論的に検証されていたもので、KEKB の設計時にも予想されていた。しかし、予想されていたのは、電子雲による多バンチ不安定性だけであり、それはバンチ毎フィードバックで充分抑制できると考えられていた。また、電子雲抑制用ソレノイドコイルも Design Report には書かれていたが、実際の建設時には組み込まれず、また、組み込む用意もできていなかった。

PEP-II の LER がアンテチェンバー付きのものになったのは、別に電子雲を意識していたからではない。LER チェンバーは LBL が製作担当だったので、彼らが経験済みの、ALS のビームパイプの設計を転用したに過ぎない。それでも、PF などで電子雲問題が起こったことが伝わると、彼らは内面に TiN コーティングを施して電子雲に対応した。PF での結果は PEP-II を助けたが、残念ながら KEKB には充分反映されなかったと言えるだろう。ただ実際には、当時 KEKB はビームパイプの製作だけで完全に手が一杯であり、とても内面のコーティングを時間内に終わらすことはできなかったであろう。

さて、実際に KEKB の LER で発生した現象は、予想したような多バンチ不安定性に加えて、より深刻な「単バンチ頭尾不安定性」であった。後者はビームの振動は見えず、一見ただ垂直方向のビームサイズが全電流と共に増大するように観測された。実は電子雲に伴う頭尾不安定性はその時点で SLAC・NLC の、F. Zimmermann 氏（現 CERN）らにより予言されていたが、KEKB においては気づく者はいなかった。程なく F. Zimmermann 氏を KEKB に招く事により、この現象が頭尾不安定性である、との仮説が現象を説明できる事が判明した。また、かなり後のことではあるが、頭尾不安定性の直接的証拠も観測された。

その後は永久磁石の設置や、より本格的にはソレノイド・コイルにより電子雲は緩和されていくのだが、現在にいたるまで、KEKB においてそれが完治したとは思われていない。二極や四極の電磁石の中にまだ電子雲は発生している。また、バンチ間隔が 2 バケ

ット以下になると、電子雲の影響が顕著になる。電子雲は古くは ISR などでも観測されていたものではあるが、KEKB はそれを大規模に、また単バンチ頭尾不安定性という新しい形の現象として発見することにより、電子雲問題を世界に向けてアピールした。今や電子雲問題は LHC, ILC, J-PARC などあらゆる正電荷ビームでは必ず検討される、加速器の一分野にまで成長した。これもまた KEKB の切り拓いたもののひとつである。

3. KEKB のコミッショニング

普通の加速器では最初の数年でコミッショニング（立ち上げ）が終わり、後は定常ランにはいる。しかし、KEKB の場合は、1999 年から現在に至るまで、いまだにコミッショニングが続けられている。それは、いまだにこの加速器が完全に性能が飽和した、とは考えられていないからで、まだまだ改良の余地があるからである。また、2007 年からはクラブ交差、という新しいフェーズでのコミッショニングにも移行した。しかし、今仮にクラブ交差をやめて交差角に戻っても、クラブ交差を通して磨いたいくつかの技を交差角でも発揮させるため、やはりコミッショニングの状態は続くであろう。

「定常ラン」を宣言していないからといって、何かマシンが絶えず不安定で、データ収集も覚束ないような状態を想像してはならない。KEKB の運転は常にある一定期間の積分ルミノシティを最大化することを目標にしてきた。だから、積分ルミノシティの向上に必要な修理・改造があれば、一時期運転を止めることもある。欠陥をかかえたまま、単にダラダラ運転していてもそれは結局積分ルミノシティを損するからである。この点で、KEKB のユーザーは Belle だけであり、目標をその積分ルミノシティを最適化することに単純化できたことは大変楽であった。実際にはある運転期間内に到達すべき積分ルミノシティを Belle との協議で定め、その目標ラインを守りつつ、目標を上回った分は、加速器のスタディ（その多くはいずれルミノシティ向上に寄与するが）に回すようにした。したがって、固定した加速器スタディの時間を割り振ったりはしなかった。もちろん、復旧に一週間以上も要するような重大事故が発生した場合は、目標の再設定が行われた。

Belle グループと KEKB 加速器グループの関係は基本的に良好である。Belle グループは常時 1 名のシフトを加速器コントロール室に配置してもらった。このため、測定器とビームの関わりは非常に良く理解で

きたし、加速器内にリング当たり約 20 個の可動コリメータの調整は Belle の人が行うことになっている。一般に、コリメータを広げすぎると Belle のバックグラウンドが増え、閉めすぎるとビーム寿命が減って入射効率が下がるが、時としてコリメータの閉め過ぎでかえってバックグラウンドが発生することもあり、ある程度の経験と熟練がないと単純には調整できない。また、一般に、その時点で位相空間内で一番閉じたコリメータが支配的になるので、コリメータを一台ずつ調整しても最適解に到達できないことがある。

KEKB の開始以来、運転時には毎朝 9 時から、コントロール棟会議室で約 30 分間、コミッションング・ミーティングを行ってきた。もちろん、土日・祝日も欠かさずである。そこでそれ以前の 3 シフトのシフト報告をコミッションング・シフトの人が発表する。時間は一人 8 分間が目安だが、当然のことながら内容によって大きく変化する。コミッションング・シフトには入射器グループの人も加わっている。このミーティングには加速器はもとより、Belle グループからも多くの方が参加し、多い時には 60 人を超えることもある。実はこのようなミーティングは SLAC の SLC 実験でも行われており、KEKB はそれに習ったのであるが、現在の KEBK のミーティングで報告される内容は当時の SLC よりも高くなっているのではないと思う。もちろん、現在の方が資料の電子化などで発表が容易になっているという面もあるだろう。しかし、現在でも KEBK が SLC にかなわないものがある。SLC の時は土日・休日のミーティングには当時の B. Richter 所長や E. Paterson 加速器部長など所の首脳部が必ずといってよいほど顔をみせていたことである。そういう首脳部の人達は、単にそこにいてだけでなく、何らかの助言を残して行ったもので、その全部が妥当だったかどうかは不明だが、少なくとも現場を勇気づけたことは確かであろう。残念ながら、これまで KEBK では、そのようなことはあまりなかったと言わざるを得ない。

さて、KEKB のような最先端の加速器（最近良く耳にする「先端加速器」という正体不明のものでなく、言葉の真の意味で）では、前もって完成型を設計し尽くすことは不可能である。それは、電流にしるルミノシティにしる、それまでの経験を超えた前人未踏の領域に飛び込むためであり、発生する現象やそれに適合

する装置を完全に予測することは無理である。したがって、実際の加速器とビームの様子を見ながら、随時改造を施すことを覚悟しなければならない。これはソフトウェア（特に上位アプリケーション）の場合は顕著で、運転開始以前に必要なソフトウェアを全部そろえる事はできないし、そのようなことを試みても後々の足枷になるだけで、全く無駄である。むしろビームの様子を見ながら順次必要なものを臨機応変に整備できる環境を作っておく方が重要である。ハードウェアについてはもちろん何でも自在に組み替える事は不可能であり、それだけ設計時の検討が重要である。

KEKB のコミッションングは、実際数々の不測の事態に直面した。その中のいくつかは事前に防止できるようなものであったが、多くはやはり実際に経験してみなければ知り得なかったものであった。しかし、そうした「失敗」の経験がすべてマイナスであったかというと、そうではない。例えば、衝突実験開始 1 ヶ月あまりの 1999 年 7 月に、Belle の心臓部である Silicon Vertex Detector (SVD) を、HER の軌道管理の甘さが原因で、シンクロトロン放射を大量に照射してしまい、破壊に至ったという大事故があった。この事故は、もし事前に加速器側で軌道管理をおこない、SVD 側でも放射光センサーなどを備えていれば、こんなに早く破壊には至らなかったかもしれない。しかし、元々この SVD は十分な放射光保護コーティングもないものであり、たとえすぐには破壊されなくても、いずれ短期間で交換せざるをえないものであった。もし、この SVD を保護しつつ運転したとすると、それはむしろ性能向上のさまたげになっていたかもしれない。結果的には、まだルミノシティが低かった早い時期に破壊してしまったのは結局プラスだったかもしれない。

いずれにしる数々の不測の事態を、直接の担当者の責任に帰するのではなく、リング・入射器・実験グループ全体で解決に取り組めるような態勢を取れたことが、KEKB の成功の鍵であった。不測の事態が発生しても、それは常に全員にオープンにできたとし、総力で困難を打開することができたと思う。さらに、放射光などの他グループ、施設部、管理局、機構首脳部、関係各企業等、全ての人々の支援があってはじめて達成できた仕事である。