

KEKBのデザイン戦略

生出勝宣

総合研究大学院大学教授加速器科学専攻/高エネルギー加速器研究機構教授

高エネルギー加速研究機構 (KEK) のBファクトリー加速器、通称KEKB加速器は、2001年4月に世界最高ルミノシティ $3.4 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ を達成した。これは、衝突地点に1平方cm当たり1秒間に両側から各 5.8×10^{16} 個という膨大な数の粒子が飛んできてくることを意味する。以来、記録は更新し続け、2002年7月現在 $7.4 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ まで到達している。最終目標は設計値 $10 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ の実現だ。

ルミノシティが高ければ高いほど、粒子同士の衝突頻度は大きくなり、当然B中間子と反B中間子のできる割合が高くなる。しかしながら、KEKBの設計に着

手した1989年当時は、CERN (欧州原子核物理学研究所) と米コーネル大学の加速器が $0.1 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ に到達していたくらいで、 $10 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ などという値は夢以外の何ものでもなかった。

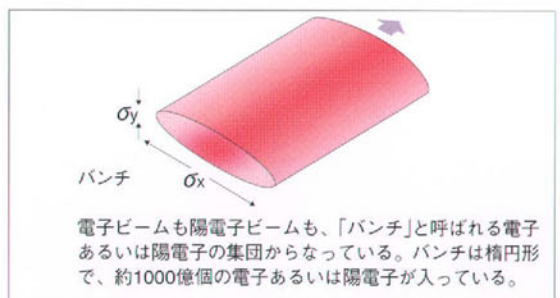
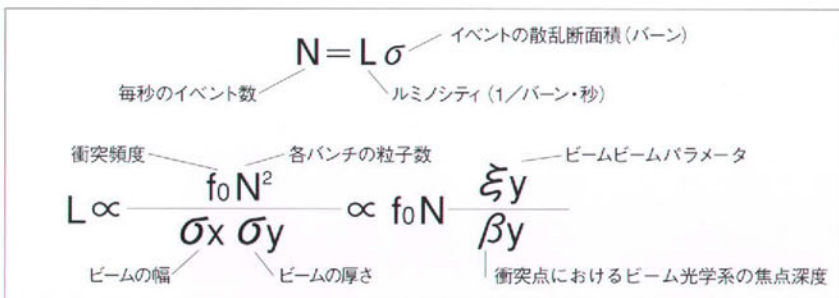
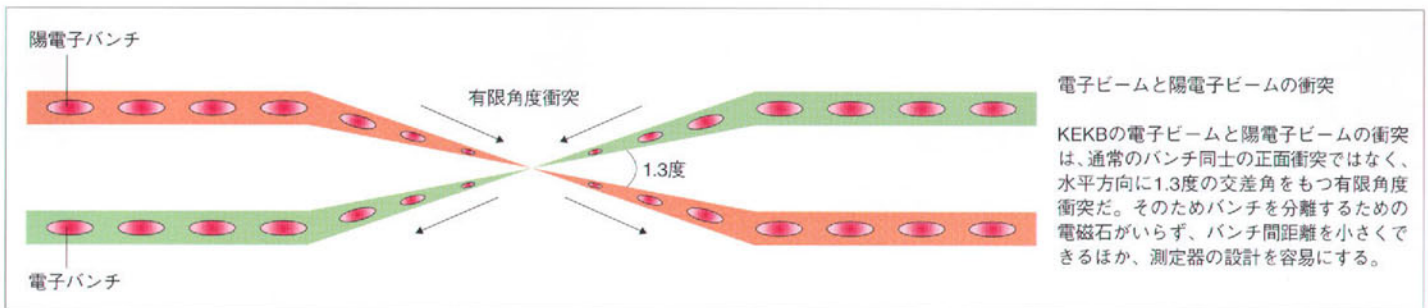
これは、われわれの競争相手である米国スタンフォード大学の加速器PEP-IIも同じで、当初は $10 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ を目標設計値にしていながら、91年頃には $3 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ に下方修正している。実際には、PEP-IIも、2001年に $4.6 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ という設計値の1.5倍にまで到達している。

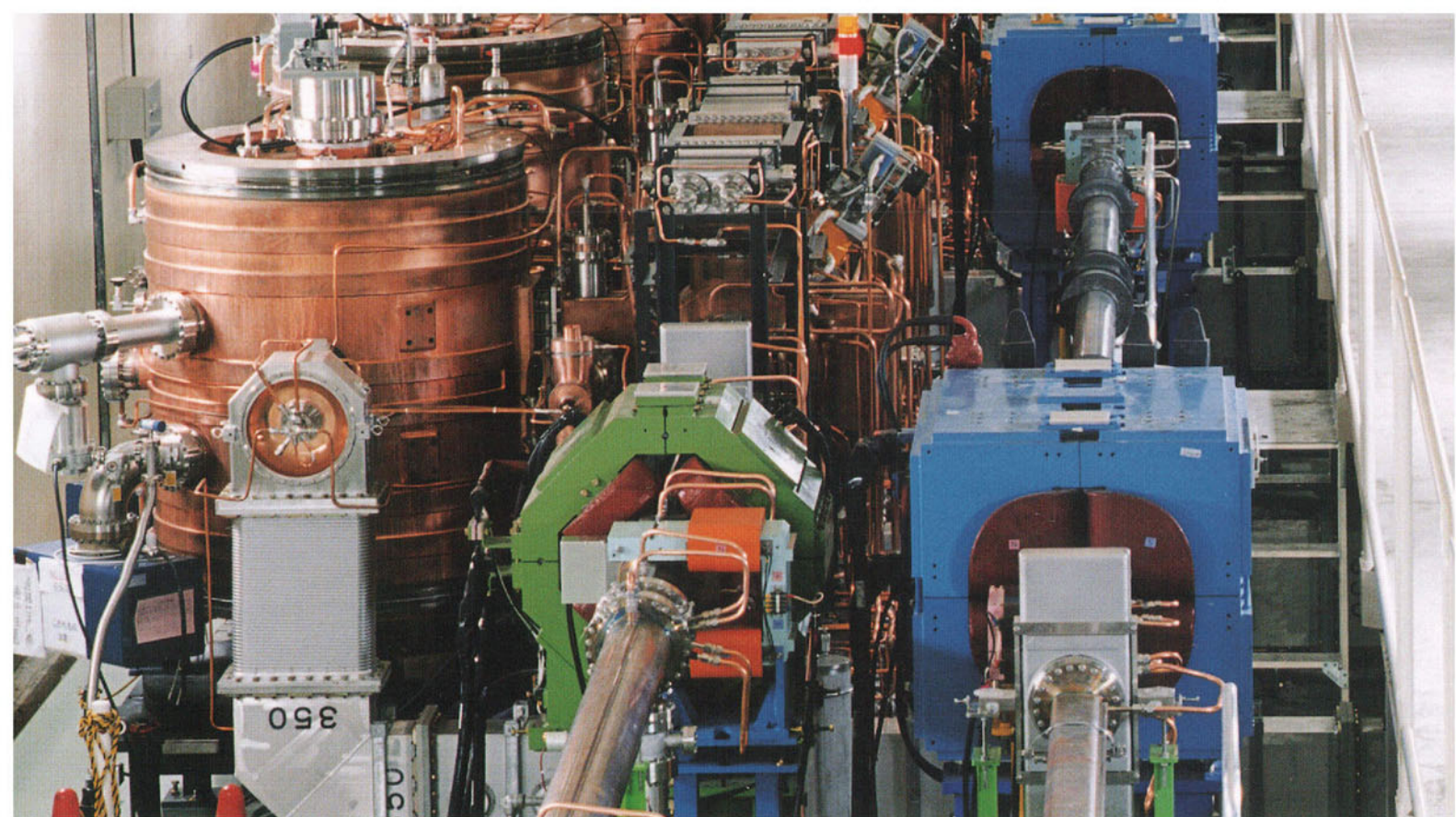
* $1 \text{nb} (\text{ナノバールン}) = 10^{-33} \text{平方cm}$
 $1 / (\text{nb} \cdot \text{秒}) = 10^{-33} \text{平方cm}$ に1秒間当たり

ルミノシティを決めるもの

KEKBの成功要因の1つは、目標ルミノシティの $10 / (\text{nb} \cdot \text{秒})$ が適切であったことにある。目標というのは単にある数値を感覚的に設定することではない。ルミノシティを決定する各要素の限界を正しく評価しなければならない。

加速器では、粒子がリング状の真空パイプの中を回っており、これを「ビーム」という。KEKBでは、電子用と陽電子用の2つのリングがあり、両者の衝突地点で交差している。電子のビームも陽電子のビームも、粒子の集団が不連続に続く





KEKB加速器のビームライン。左側の樽のように見えるのがARES常伝導加速空洞。

パルス状になっており、1つ1つの粒子集団を「バンチ」と呼ぶ。

バンチは楕円形で、KEKBでは水平100ミクロン、垂直3ミクロン、進行方向6 mmの大きさとなっており、約1000億個の粒子を含んでいる。

ルミノシティは、バンチで構成されたビーム全体の粒子数を表す「電流」と、衝突地点で2つのビームが互いに及ぼし合う力の大きさ「ビームビームパラメータ」に比例し、衝突点における「焦点深度」に反比例する。そこで、「電流およびビームビームパラメータをどれだけ大きくすることができるか」、「焦点深度をいかに浅くして、どれくらいビームを細くできるか」、がルミノシティ設計値の要になる。

大電流がもたらすダメージ

まず電流だが、この限界値を決めるのは、実はかなり難しい。KEKBの場合、 $10/(nb \cdot \text{秒})$ に必要な電流は陽電子リングで2.6 アンペア、電子リングで1.1アンペアという値である。一方、かつてのTRISTANの最高値は0.015 アンペアであ

り、設計当初は途方もない数値に感じられた。

リングに大電流が流れる、つまり多数の電子や陽電子が運動すると、「高次高周波」や「放射光」という強い電磁波を発生する。そのため、さまざまな個所で発熱や放電が生じ、加速器のコンポーネント（構成部品）にダメージを与える。

そこで、十分な冷却システムを導入するなど、ダメージに耐えうる設計をしなければならないが、「どこに、どのようなダメージが、どの程度発生するか」をあらかじめ知ることは非常に難しい。

実験で確かめようにも、同じような状況を他の手段で実現することはできないので、実際に加速器をつくってみるより他に手はない。

それでもKEKBの場合、TRISTANの入射用加速器（現在は放射光利用施設となっている）に0.5 アンペアまで電流を蓄積して予備試験を行うことができた。これは非常に有益なステップであったが、すべてのコンポーネントを試すことができたわけではない。また、ビームの条件も

KEKBと同じではない。

結局、理論から押さえられるところはすべて押さえた上で、あとは実際につくって経験を踏むしかない。98年のKEKB加速器建造後、幾度もトライアンドエラーを繰り返しながら、少しずつ進歩してきた。

大電流がもたらすビーム不安定性

大電流の引き起こすもう1つの問題は、「ビーム不安定性」だ。

ビーム不安定性にもいろいろな種類があり、その1つはファラデーの電磁誘導の法則による。電荷をもつ粒子が走れば、導体のパイプには誘導電荷が生じ、これのつくる電磁場が逆に粒子に作用して、粒子やバンチ全体が大きく振動して不安定になり、ついには壁にぶつかり、ビームが消えてしまうこともある。

じつは、パイプの壁面が滑らかな場合は、その影響は小さい。そこで、パイプ内部に凹凸をつくらないようにするのが第一だ。しかし、各種モニターの設置や、パイプの継ぎ目にある膨張・収縮を吸収

するための蛇腹構造など不可欠なものも多く、凹凸をまったく排除することはできない。そこで、不安定なバンチに電子回路によるフィードバック制御をかけて、元に戻すような対策がとられている。

もっとやっかいなビーム不安定性は、マイクロ波で粒子を加速することから生じる。粒子はほぼ光速で回っているが、そのエネルギー源は、クライストロンという装置で発生させたマイクロ波だ。マイクロ波をパイプに接続した空洞（加速器空洞）に導き、そこを通過する粒子にエネルギーを吸収させる。

ところが、前にも述べたように、粒子自体も放射光や高次高周波などの電磁波を出すので、それが加速空洞と共鳴して強い電磁場をつくりだし、これが後続のバンチに力を及ぼし振動させる。その影響は拡大しながら次々と後続バンチに及び、ついにはビームが失われてしまう。

その安定化も、従来はフィードバック制御によって行われてきた。しかし、

KEKBのようなバンチ数の多い大電流加速器では、フィードバック回路が非常に複雑になる。事実、フィードバック制御を全面的に採用したスタンフォード大学PEP-IIでは、フィードバック回路のためのフィードバック回路が必要になるなど、システムの複雑化は相当なものになっている。

一方、KEKBでは、加速機構の技術革新によってビームの安定化をはかった。ARES常伝導加速空洞は、KEKBの独創的な発明である。この加速空洞では銅製の樽のような部分にマイクロ波を溜め込む。すると、あたかも堀一杯溜め込まれた水のようにマイクロ波が安定化し、ビームの影響を受けにくくなる。そのため、ビームのほうも安定化する。

また、超伝導加速空洞はマイクロ波を導く空洞を超伝導状態にしたもので、この空洞のマイクロ波は周波数成分の狭い非常にシャープな波となるため、他の電磁波の影響を受けにくく、安定化する。

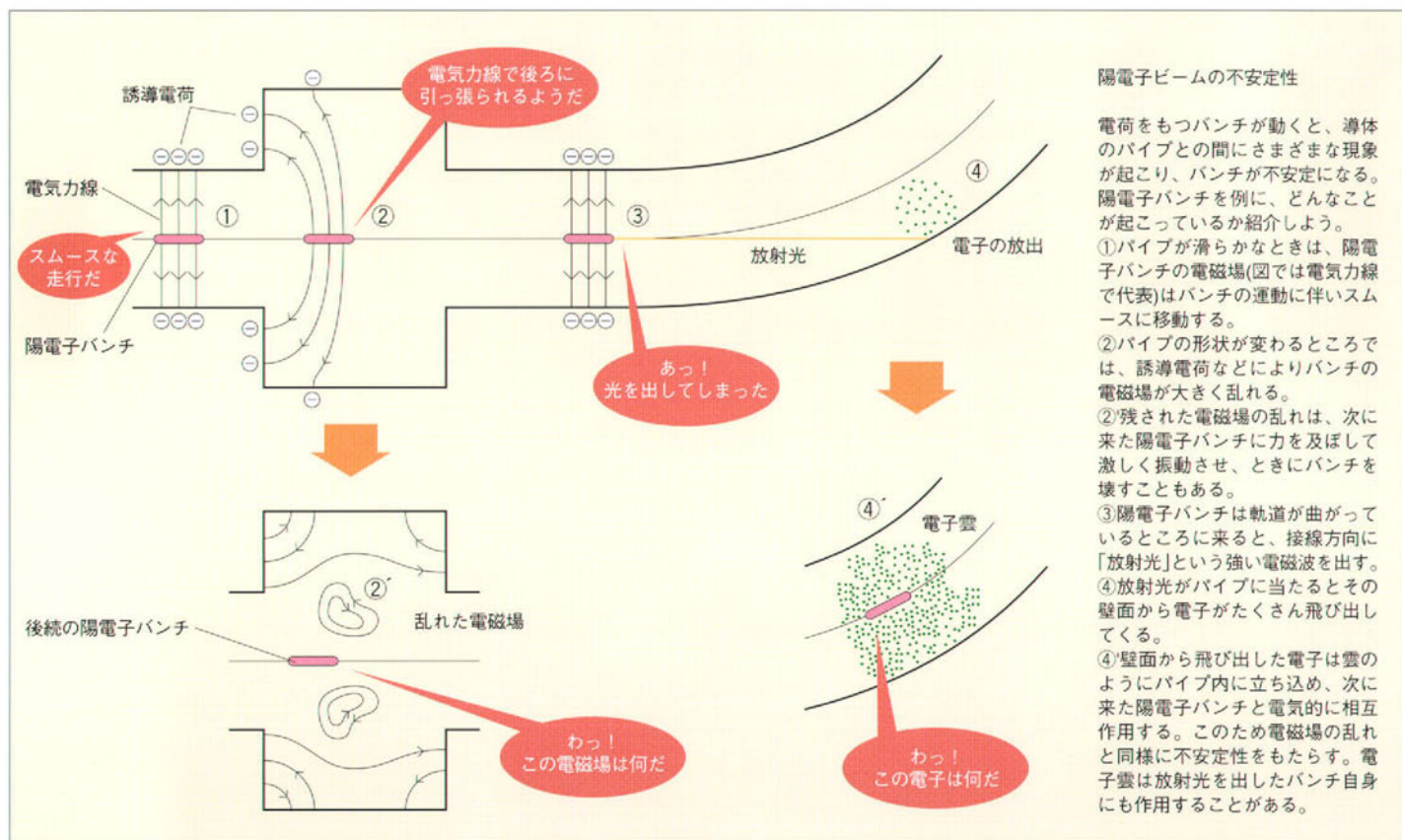
超伝導加速空洞は、TRISTANの経験を踏まえ進化させたもので、これもKEKB固有の技術だ。

われわれは、加速空洞によるビームの不安定化に対し、PEP-IIとは逆の戦略をとってきた。PEP-IIの加速空洞は伝統的な技術の上に立ち、コンパクトで安価だが、複雑なフィードバック機構を用いざるをえない。現在までのところ、安定性ではKEKBが勝っているといえるだろう。

電子雲によるビーム不安定性

設計当初から、より深刻な問題として危惧されていたのは、「電子雲による陽電子ビームの不安定性である。陽電子ビームが出す放射光がパイプに当たり、そこから放出される電子が雲のようにたちこめ、陽電子に作用するというものだ。

この現象は、KEKにあった放射光利用加速器における研究で、初めて明らかにされた。従来から、陽電子リングには大電流を溜められないことは知られていた



が、その理由は不明だった。

KEKBの設計が確立した時点では、電子雲は後続のバンチにのみ影響を与え、フィードバックで抑制できるという見通しを立てていた。実際、後続バンチへの影響はうまく排除できたのだが、電子雲をつくったバンチそのものが直接影響を受ける「単バンチ不安定性」も、KEKBでは発生した。これは、それまで知られていなかった現象である。

単バンチ不安定性については、原因の究明、解決までを約半年で行うことができた。じつは、設計レポートの段階で、電子雲の発生に対処するには、加速リング全体にコイルを巻いてソレノイド磁場をつくり、できた電子をどかしてしまうという対策を提案していた。もっとも当時は、そこまでする必要はあるかどうかの確信はなく、装置自体はつくっていなかった。

言うなれば、「何か不都合が起きたらソレノイドだ」と思っていたら本当に起きたわけだ。結局、研究者総出で、リング全体のあちらこちらにコイルを巻いた。

こうした大電流実現のためのさまざまな努力により、すでにKEKBでは陽電子のリングで1.5アンペア（目標2.6アンペア）、電子のリングで1アンペア（同1.1アンペア）で稼動している。

新しい光学系の導入

目標ルミノシティ設定の次なる課題は、衝突点におけるビームの絞り方の検討だ。

ビームを構成するバンチ1個1個には1000億個の粒子が入っているが、各粒子はバンチの中で、ありとあらゆる方向にさまざまな振幅で振動しており、いろいろなエネルギーをもっている。ちょうど白色光（太陽光）が紫外から赤外までの波長（周波数）の電磁波で構成されているのと同じだ。

したがって、衝突点でビームを絞って細くすればするほど色収差が増大する。白色光をレンズで強く収束させると、周波数によって焦点距離が違うため、像の周辺部がぼやけて色づくが、これが色収差だ。電子や陽電子ビームでいえば、エ



KEKB加速器の六極レンズ（磁石）とビームパイプ。パイプを囲んでいるのが電子雲除去のためのソレノイド。

ネルギーの高すぎる粒子や低すぎる粒子は収束せず、使えないことを意味する。

電子や陽電子ビームを絞り込むのは電磁石だが、これをレンズと呼んでおり、絞り込む機構のことも光学系と呼ぶ。色収差の補正には六極レンズ（6個3対の磁極からなる装置）を置くが、これは非線形レンズなのでカオス現象が起り、理論的な予測はほとんど不可能か、きわめて精度の悪いものになる。結局、コンピュータ・シミュレーションに頼るしかない。

このカオス現象のため、安定して回る粒子の振幅には上限値「力学口径」ができる。力学口径をいかに大きくするか、つまりいかに振幅の大きい粒子まで安定に回すことができるかが、光学系の設計の要点となる。そこで、六極レンズをどのように配置すれば、より高いエネルギーの粒子をきちんと捕獲、補正できるのかをシミュレーションしていく。

シミュレーションの前には、まず力学口径の大きな光学系をつくる設計原理が必要だ。原理に基づいたモデルをコンピュータに取り込み、各磁石の性能や位置に関するパラメータ（変数）を少しずつ変えてシミュレーションを行い、力学口径が最大になる組合せを探り出していく。

設計原理はアイデアの問題である。

KEKBではまったく新しい光学系を考案した。従来の光学系は、同じ強さの六極レンズを単に配置するだけだった。一方、KEKBでは、最も色補正に効果のある位置に六極磁石を配置し、六極磁石の強さが最小ですむような光学系にした。そのために、1個1個の六極磁石を独立にコントロールできるようにしてある。

これは、非線形効果を最小限に抑えつつ色収差を補正でき、また各種のビームパラメータを容易に変更できるというすぐれた光学系だ。あまりにすばらしいので、最初は半信半疑だったが、TRISTANの入射用加速器での実証実験により、ほぼ確信がもてた。

シミュレーションコードSADの威力

シミュレーションを行うには、そのためのコード（プログラム）も必要だが、コードの内部でどのような計算が進行しているかを熟知していないと、きわめて危険だ。どんなシミュレーションでも必ず近似を含み、近似の適用限界を越えては有効性がないからだ。

KEKの加速器理論グループは、TRISTANでの経験から自前のシミュレーションコードSADの開発を進めていた。そのため、KEKBにも使えるように

近似の適用限界を高くするのは容易だった。

SADによるシミュレーションはKEKBで有効だったが、他の加速器にそのまま通用できるわけではない。それぞれ加速器に即したコードの開発が必要不可欠である。SADもKEKBの本質に適合するよう徹底的な改良を施してある。

そもそもSADという名前は、欧州CERNのシミュレーションコードMADに対抗して付けられた。MADは、いろいろなシミュレーションコードを集めたもので、汎用コードとされている。一方、われわれは、汎用コードというのは、「常識的な範囲の加速器には対応できる」という以上のものではないと考えている。

PEP-IIでは、われわれとは異なり、MADに、さらにさまざまなコードを組み合わせて使用している。

さて、いかに光学系の設計がすぐれ、

それに基づくシミュレーションで画期的な答えが出たとしても、これを実現するハードウェアと適合していなければ意味がない。

KEKBでは光学系の設計グループと電磁石の開発グループとが緊密に連絡を取り、製作された電磁石の磁場が測定されるやいなやそのデータをSADに入れて性能を確認する作業を行ってきた。

また、現実の加速器では、磁石の配置や磁場の値などに、さまざまな誤差が入りこむのは避けられない。それをどう補正し設計値に近づけていくかが重要になってくる。この作業なしには、どんな加速器でも、ビームを一周させることすらできない。KEKBのような大規模・大電流の加速器では、温度変化などで、その状態が刻々変化するので、補正を頻繁に行う必要がある。

そこで威力を発揮するのが、またもやSADだ。このコードでは、モニターからの各種情報をもとにリアルタイムで、光学系の測定・解析・補正・グラフィック表示を実現でき、これを使えば1回の光学系の補正を約5分で行うことができる。そのため、KEKBでは頻繁に軌道補正を行うことが可能だ。

このようにSADは、シミュレーションという開発面だけでなく、軌道補正という運営面でも活躍しており、加速器性能向上に決定的な役割をはたしている。

ビームビームパラメータを決める

ルミノシティを決める最後の課題は、「ビームビームパラメータ」である。

2つのビーム、正確には2つのバンチが衝突すると、たがいに力を及ぼし、相手のバンチを変形させるが、この大きさを

KEKB加速器のコントロールルーム。光学系制御の新しいアイデアが成功した瞬間。



生出勝宣（おいで・かつのぶ）

1981年から高エネルギー物理学研究所(KEK、現高エネルギー加速器研究機構)で加速器の研究を行っている。加速器というものはさまざまな実験研究の道具にすぎないが、各実験の結果の成否を左右する最重要要素でもある。そこでは創造、忍耐、協力といった個人やチームの総合的な資質が問われる。同じような加速器でも、取り組み方によって性能が何倍も違う場合がある。だから加速器はおもしろい。



表すのが「ビームビームパラメータ」だ。これが大きいほど粒子同士の衝突確率は高くなるが、一方でパンチの不安定性も増して、ある値を越すとパンチがばらけてしまう。どこがその限界値なのかを見極めるのが、加速器設計の1つの要になる。

現実の加速器では、この値が最も大きいのがCERNのLEPの0.1で、通常は0.03程度である。LEPはルミノシティではなくエネルギーを上げることを目的としているので、KEKBの範にはならない。

KEKBでは最終的に0.05と決めて設計したが、値の見極めは、またしてもシミュレーションに頼るしかなかった。

KEKBを設計した1990年当時は、コンピュータの能力のこともあり、一方のビームのみ変形させ、片方のビームの変形を無視した「強弱モデル」でシミュレーションを行った。その代わり「強弱モデル」の相互作用をできるだけ近似を排して表現するために、ほとんど趣味的と言えるような凝ったコードをつくった。0.05というのはそういう根拠をもって決めた数値だ。

現実にKEKBでも0.042くらいまで達成されているので極端な間違いはなかったことになる。また、現在では両方のビームを変形させる「強強モデル」によるシミュレーションも可能だが、その結果も「強弱モデル」と矛盾しない。

KEKBの衝突において最も特徴的なのは、正面衝突ではなく、水平方向に約1.3度の交差角をもって衝突することだ。交差角があると2つのビームの分離が容易になり、パンチ間隔を短縮できる。そ

のため、より多くの粒子をビームに詰め込むことができるし、衝突後の電子と陽電子を分離する磁石が不要になるので、ビームの絞込み用磁石を衝突点により近づけることができる。

問題は、ビーム同士の及ぼし合う力が複雑になり、理論的解析やシミュレーションが難しくなることだ。KEKBでは相対性理論に基づく数学的処理によって問題を単純化するというアイデアでこれを克服した。

また、万一の場合のバックアップとして「蟹交差」とよばれる方法を準備することにした。これは、衝突直前の電子と陽電子双方のパンチに電磁氣的な力をかけてその軸を傾け、結果的に正面衝突を起こさせる方法で、その装置の開発を現在ほぼ終えている。

じつは、交差角をもった衝突には、30年前にドイツの加速器DORISが試みて失敗したという教訓がある。それゆえ、数々の利点にも関わらず、採用に踏み切るケースがそれまでなかった。

われわれはドイツから経験者を招き、当時のDORISについてシミュレーションを一緒に行った。そして、交差角そのものには問題はなく、当時の光学系の診断・補正能力では交差角が影響しないようなパラメータ領域で運転することができなかったことが原因だと判断した。

それでもタブー視されてきた交差角の採用には心理的な不安がつきまとったし、事実やめたほうがいと忠告する研究者もけっこういた。加速器の運転がはじまり、予想通り何の問題もないことが

わかるまでは心配のしどおしだった。

値の根拠を与えるのは物理学のみ

PEP-IIはビームビームパラメータの値として0.03をとったが、これは特別な根拠をもって決められた値ではない。絶対安全な数値としていわば経験的に決めたものだ。

ビームビームパラメータには、その上限が0.03付近であるという長年にわたる信仰のようなものがあり、0.03の根拠を説明すると称するわけのわからない論文さえいくつ出版されている。

PEP-IIのビームビームパラメータは実際に0.03までしか達成されておらず、有限交差角のKEKBのビームビームパラメータの方が正面衝突のPEP-IIよりも大きいという皮肉な結果になっている。

これは、設計において根拠のない安易な目標を設定すると、いろいろな装置や道具がその値を実現するレベルにとどまってしまう、結局それ以上の性能に到達できないという例ではないかと思う。目標は高いにこしたことはないが、明確な根拠をもっていないと、これまた無駄な努力の末に玉砕する恐れが十分にある。

設計値の「根拠」を理論的にも、実験的にも可能な限り確かなものにするのは、「物理学」のみであり、経験則や思いこみ、熱意などでは決していない。

今後も加速器はつくられていくだろうが、「ビームは物理学によってのみ記述される」という当たり前のことを忘れてはならない。