

# SuperKEKB 計画

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

飛山 真理

on behalf of KEKB 加速器グループ

makoto.tobiyama@kek.jp

2009 年 2 月 6 日

## 1. はじめに

KEKB 加速器は強力な競争相手であった SLAC の PEP-II 加速器が 2008 年 4 月に運転を終了した後も運転を継続し、Belle 検出器に世界最高ルミノシティを供給し続けている。この KEKB 加速器を大幅に改造し、最高ルミノシティを現在の約 30 倍に増加させ、フレーバー物理を強力に推進する SuperKEKB 計画の検討が急ピッチで進んでいる。ここでは、この SuperKEKB 加速器検討の現状を、現在進行しているハードウェアの開発研究を中心に紹介したい。

最初に衝突型加速器の性能を表す指標であるルミノシティについて参考文献[1]に従って紹介し、これを劇的に向上させる方法を概説する。次に、本 SuperKEKB 計画の加速器ビームのパラメータを示し、最後に現在進んでいるハードウェア開発の例として、1)真空チェンバー開発、2)ビームモニターシステムおよびフィードバック機器開発を中心に紹介する。

## 2. 衝突型加速器のルミノシティ

ある物理現象が一秒間に起こる頻度を  $R$ 、1 組の粒子対が衝突してその物理現象を起こす反応の断面積を  $\sigma$  とすると、ルミノシティ  $L$  は、

$$R = L\sigma$$

という関係で表せる。現 KEKB 加速器のルミノシティは  $1.6 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  辺りなので、もしも興味のある物理現象の反応断面積が  $1 \text{ nb}$  ( $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ) 程度だとすると、1 秒間に約 16 回の現象が起きることになる。加速器の年間運転時間を 2000 時間とすると、1 年間で約 1 億回の現象を起こすことができることになる。もしも対象の物理現象の反応断面積がもっと小さい、稀にしか起きない現象であり、さらにその現象について十分な統計量を確保したければ、ルミノシティを大幅に上げるか、あるいは延々と何十年にもわたって実験を続ける必要がある。

衝突型加速器のビームはバンチと呼ばれる塊を形成しており、あるバンチと他のバンチがお互いに反対方向に進んで衝突したとする。両方のバンチは水平、鉛直方向に同じ

ようにガウス分布をしていて、ビームサイズが  $\sigma_x^*$ 、 $\sigma_y^*$  であらわせるとする。それぞれのバンチ内の粒子数が  $N_+$ 、 $N_-$  で、一秒間に衝突する回数を  $f$  とすると、ルミノシティは、

$$L = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

という形で表される。これから、ルミノシティを高くするためにはさしあたって、

- バンチ当たりの粒子数 ( $N_+$ 、 $N_-$ ) を大きくする。つまり、バンチ電流を大きくする、
  - 衝突頻度 ( $f$ ) を大きくする。つまり、バンチ数を増やす、あるいは高周波加速周波数を上げる、
  - 衝突点でのビームサイズ ( $\sigma_x^*$ 、 $\sigma_y^*$ ) を絞る、
- という方法を思いつくが、もちろん実際はいずれも簡単にはいかない。

電子陽電子衝突型加速器の場合、たとえば電子ビームは衝突点において反対方向からやってくる陽電子ビームとのクーロン相互作用により運動に大きな影響を受ける。このようにビームの衝突により起こる効果のことをビーム・ビーム相互作用と呼ぶ。この現象は非線形で、二次元あるいは三次元で取り扱う必要があり、またビーム同士がお互いに影響を受け合うという意味で集団の効果、つまり多粒子系として扱う必要があり、大変奥が深い。

ビーム・ビーム効果の目安として、ビーム・ビームチューンシフト(ビーム・ビームパラメータ)という量を用いる。陽電子と電子との衝突時に働く力は引力であり、お互いに引き寄せる(絞る)ように働く。このためビーム・ビームによる力は近似的には、リング内のある一点に薄いレンズをおいたように表せ、それぞれのビームの  $x, y$  方向のビーム・ビームチューンシフトは、

$$\xi_{x\pm} = \frac{r_e N_{\mp} \beta_x^*}{2\pi\gamma_{\pm} \sigma_x^* (\sigma_x^* + \sigma_y^*)}$$

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e N_{\mp} \beta_y^*}{2\pi\gamma_{\pm} \sigma_y^* (\sigma_x^* + \sigma_y^*)}$$

のように表される。ここで、+ は陽電子を、- は電子を表し、 $r_e$  は電子の古典半径、 $\beta^*$  は衝突点のベータトロン関数、 $\gamma$  はそれぞれのビームのローレンツ因子である。これから

見ると、あるビームのビーム・ビームチューンシフトは相手のビームのパンチ強度に比例し、自分のビームのエネルギーに反比例する。またルミノシティについては、

$$L \propto N_+ N_- \propto \xi_+ \xi_- \leq \frac{(\xi_+ + \xi_-)^2}{4} = \xi_{\max}^2$$

の関係から、電子と陽電子のビーム・ビームチューンシフトが等しいとき、つまり、

$$\frac{N_+}{\gamma_-} = \frac{N_-}{\gamma_+}$$

の関係（エネルギー・トランスペアレンシー）が成り立つときが最大となる（あくまで近似なので実際には成り立たないことも多い）。では、このエネルギー・トランスペアレンシー状態で（しかも両リングのビームサイズも、ベータatron関数も等しい状態）、ルミノシティを最大にする条件をさがすことにする。この状態では電子と陽電子のビーム・ビームチューンシフトは等しくなり、 $x$ - $y$  カップリングを  $r = \sigma_y^* / \sigma_x^*$  とおくと（ $\sigma^* = \sqrt{\varepsilon \beta^*}$ 、 $\eta^* = 0$  を仮定）、

$$\frac{\xi_{y,\max}}{\xi_{x,\max}} r = \frac{\beta_y^*}{\beta_x^*} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

が満たされるときとなる。さらに  $x$  方向と  $y$  方向のビーム・ビームチューンシフトが等しくなると仮定すると、結局、

$$r = \frac{\beta_y^*}{\beta_x^*} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

というとき（optimum coupling という）、ルミノシティが最大となる。この  $r$  を使ってルミノシティは、

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_c} (1+r) \frac{e N_{\pm} f \xi_y}{\beta_y^*}$$

と書ける。結局、ビーム・ビームパラメータまで考慮に入れるとルミノシティを高くするためには、

- ビーム電流（ $I = e N f$ ）を大きくする、
- 衝突点の鉛直方向ベータatron関数（ $\beta_y^*$ ）を小さくする、
- ビーム・ビームチューンシフトの限界をなるべく高くする、
- ビームエネルギーを大きくする、
- カップリング（ $r$ ）を大きくする、

という手段が必要となる。このうち、まずビームエネルギーについては必要とする物理現象で決まるので変えられない。また、カップリングについては、通常の蓄積リングは  $y$  方向のエミッタンスが  $x$  方向に比べて非常に小さいため、たとえばベータatronチューンを共鳴線にのせて  $y$  方向にエミッタンスを回すことなどは可能ではあるが、このまま太らせたのではダメで衝突点で  $y$  方向のみならず  $x$  方向も大幅に絞る必要があり、軌道光学上の困難がある（実際 round beam collision というアイデアは昔からあるが、低エネルギーマシン（VEPP2000）の例しかない）。そこで、残りの項目で勝負することになる。

電流を増加させると、放射光パワーも比例して増加するのでその分 RF システム（空洞、パワー源）を増強する必要があるし、放射光パワーを受け取る真空チェンバー側も、単純に熱を処理するだけでも大変だが、それに加えてビームからのより強力な高周波にも耐えられる真空部品を用意しなければならない。これらは加速器の建設コストに直接影響するし、将来にわたって運転コスト（電気代）も大きく上昇させる。また、電流増加により、より低いインピーダンス源でもビーム不安定が起きようになるので、パンチフィードバックによるビームの安定化への負荷が増えることになる。フィードバックが抑えることができるのは重心振動だけなので、より高次のパンチ内不安定現象がおきるようだ。手の打ちようがなく、不安定が起きる電流値未満に電流が制限され、ルミノシティが制限されてしまう。

次に衝突点の鉛直方向ベータatron関数  $\beta_y^*$  を出来るだけ小さく絞ることを考える（optimum coupling の条件からは  $\beta_x^*$  も当然絞る必要がある）。衝突点で両ビーム両方向のベータatron関数が極小値を持ち、かつそれを最小にするため、衝突点直近に非常に強力な QD 磁石（鉛直方向に収束、水平方向に発散する磁石）、その外側にある程度強力な QF 磁石（水平方向に収束）をおき、 $\beta_y^*$  を強烈に（数 mm まで）絞り、 $\beta_x^*$  についてはある程度（数十 cm 程度）絞るよう twiss パラメータのマッチングをとることが可能である。この場合、衝突点では確かに  $\beta_y$  は小さいが、衝突点から離れるに従い急激に増大し、衝突点からの距離を  $l$  とすると、

$$\beta \approx \frac{l^2}{\beta^*}$$

のようになる。たとえば  $\beta_y^* = 7 \text{ mm}$  とすると、2 m 離れたところでは  $\beta_y > 500 \text{ m}$  になり、普通のセルと比べビームサイズ、COD が数倍以上になる。これは、真空容器のサイズにも磁石のボア径にも影響し、逆にこの口径によりビーム寿命、入射効率などにも大きな影響を及ぼす。このため、出来るだけ最終収束磁石群を衝突点に近づけたいが、検出器との物理的干渉、また衝突によりエネルギーを失った粒子がこの磁石によって大きく曲げられ検出器に入ってしまう問題などがあり、加速器の都合だけでは決められない。

さらに、実際のビームは有限のパンチ長を持っている。ゼロ電流のパンチ長は、リングのエネルギー幅、momentum compaction factor  $\alpha$ （運動量の違う粒子がどれだけ余計な長さリングを回るかを表す量で、周長を  $C$ 、粒子の運動量を  $P$  とすると、

$$\frac{\Delta C}{C} = \alpha \frac{\Delta P}{P}$$

で表される）と高周波加速電圧で決まり、ゼロでない電流ではさらにリング内インピーダンスの影響で伸びたり縮んだりするが、このパンチ長が衝突点の  $\beta_y^*$  より長くなると、衝突中にパンチの頭、あるいは尻尾は  $\beta_y$  の大きなところに

いることになるので、ルミノシティで損をする。この効果を hourglass (砂時計) effect と呼び、絞りすぎるとトクをしないどころか絞らないときよりもルミノシティを損する。このため、パンチ長は  $\beta_y^*$  程度まで短くするか、あるいは  $\beta_y$  を絞るのはパンチ長程度までであきらめることになる。パンチ長を短くすると、ビームからくる高周波はパンチ長の逆数程度の周波数のところまで伸びているので、より高周波成分が増え、真空容器でのパラシティックロスが増える(つまり、高周波加速装置の負担、電力負担が増える)と同時に、パンチ長が長かったときに効かなかった高周波側のリングインピーダンスもビームに影響するようになり、思わぬ発熱、故障、不安定などが発生することがある。さらに、リングのインピーダンスが大きいと、せっかく短くしたパンチがパンチ電流とともに伸びて(安定化する方向)ルミノシティ低下につながることもあり、容易ではない。

衝突点で小さくベータatron関数を絞ることによるリング光学への影響として、強力な収束力が集中することにより、衝突点近傍(IR)で大きな局所的な色収差が生じることも問題となる。この色収差を補正しないと、ビームを安定に蓄積できなくなるので、通常六極磁石を使い補正することになるが、六極磁石の選択によってはダイナミック・アパーチャが小さくなり、ビーム寿命が短くなったり、入射が出来なくなったりする。このため、衝突点付近に局所的に六極磁石を配置して衝突点で発生した色収差を出来るだけ近くで消す工夫をしたり、アーク部の六極磁石を入れ子にせずに  $-I$  変換で結ぶなどの工夫がされるが、なにせ強烈な非線形の話なので、最後は加速器で実際に試してみないとどうなるか分からないことが多い。

さて、このような各種工夫をして、実際にルミノシティがどうなるかについては、(1)果たしてその optics でちゃんとビームが回るのか(衝突点が成立するか、十分なダイナミックアパーチャがあるのか)という点と、(2)前述のビーム・ビームパラメータがどうなるか、つまり多体系の非線形衝突現象がどうなるか、といういずれも数値シミュレーションを行って検討する必要がある。シミュレーションで大丈夫でも現実にはダメなことは多いが、シミュレーションでダメなものが現実で復活することは通常はない。

### 3. 次世代高ルミノシティマシン

#### 3.1 SuperKEKB

ルミノシティを大幅に向上させる方法の一つは、前述の向上策を比較的素直に適用する方法である。つまり、電流をがんばって上げ、衝突点のベータatron関数は現実的に可能な限り絞り、パンチ長も可能な限り短くする、といったものであり、本 SuperKEKB 計画は基本的にこの方法を

採用する。さらに crab 交差を採用することにより有限角交差の場合に比べ、最大で 4 倍程度ルミノシティが向上することがシミュレーションにより示されているので、クラブ空洞付き衝突が基本である。検討においては、現行 KEKB リングの資産を出来るだけ再利用して、改造に要するコスト、時間を切り詰める、という厳しい条件が課せられており、たとえばアーク部の磁石は配置も含めて手を付けないなどの条件で最適化することになる。SuperKEKB の(執筆時点での)パラメータを表 1 に示す。

表 1. SuperKEKB のパラメータ

Parameter	LER/HER	Unit	
Emittance	$\epsilon_x$	24/18	nm
	$\epsilon_y$	0.24/0.09	nm
Beta at IP	$\beta_x^*$	200/200	mm
	$\beta_y^*$	3/6	mm
Bunch length	$\sigma_z$	5/3	mm
Transverse damping time	$\tau_x$	60/40	ms
Betatron/synchrotron tune	$\nu_x / \nu_y / \nu_s$	.505/.5905/.025	
Beam Energy	$E_+ / E_-$	3.5/8.0	GeV
Beam current	$I_+ / I_-$	9.4/4.1	A
Number of bunches	$N_b$	5018	
Crossing angle	$2\phi_x$	30 $\rightarrow$ 0	mrاد
Beam-beam parameter	$\xi_x$	0.182/0.138	
	$\xi_y$	0.295/0.513	
Luminosity reduction	$R_L$	0.86	
Luminosity	$L$	$5.3 \times 10^{35}$	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

現在の KEKB と比べると、大まかに衝突点のベータatron関数で 2 倍強、ビーム・ビームパラメータで 4 倍半、ビーム電流で 4 倍弱がんばることで、ルミノシティが約 30 倍になる、という計算になる。図 1 に最新のビーム・ビーム計算の結果(横軸 turn 数、縦軸ルミノシティ)を示す。

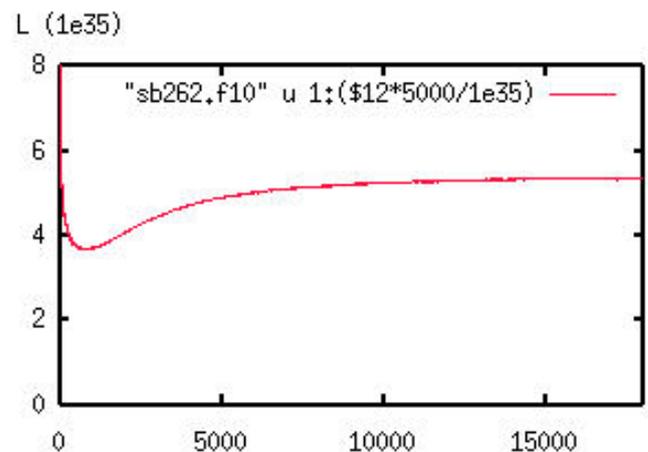


図 1 Strong-strong シミュレーションによる SuperKEKB のルミノシティ

LoI 時でのパラメータ[2]と比べ、各種の検討が進んだ結果、後退した部分(たとえば LER のパンチ長および衝突点の  $\beta_y^*$ : これは coherent synchrotron radiation のシミュレーションで短くはできないことが分かったため)、よりよいパラメータが見つかった部分などがあり、全体的にはルミノシティは微増、という形になっている。

この方式は基本的には正統的な力任せのルミノシティ向上策であり、前述のようにリングのハードウェア、特に真空チェンバー、高周波加速系、モニター系(フィードバック系)の開発への負荷が非常に大きい。しかしながら、これらについては(少なくともある程度のコストおよび時間をかければ)現行の技術の延長上の解決可能なものがほとんどであり、optics を含め現時点で解がないという話ではなく、現時点で不明あるいは怪しい部分でも、運転開始後の study、改善で十分に対処可能な部分も多いと考えられ、実現性は極めて高いといえる。しかしながら、よりルミノシティを上げる、また、改造コスト、運転コストを下げるため、たとえば衝突点をより絞る、パンチ長が長くてルミノシティやビーム寿命が下がらないように、crab 空洞と六極磁石を組み合わせる(traveling waist)方式などの検討、衝突点の検出器配置、検出器ノイズを含めた最適化、改造開始に向けすべてのパラメータの最適化の検討が、加速器および物理側の密接な協力のもと現在急ピッチで進んでいる。

### 3.2 Crab waist 方式

イタリア・フラスカティ研究所の P. Raimondi が提唱した、もう一つの有力なルミノシティ向上法が crab waist 方式である[3]。これは、

- 両リングのエミッタンスを現状より大幅に下げる(ほとんど ILC ダンピングリング並)、
- 衝突点のベータatron関数を、これまた ILC 衝突点のように大幅に絞る、
- 交差アングルを大きくとり、衝突点からちょうどよい位相の場所においた強力な六極磁石ペアにより、鉛直方向のベータatron関数の極小値をパンチ長に沿って進行方向にずらすことにより、長いパンチ長でも hourglass 効果や不要なビーム・ビーム効果に邪魔されずに高いルミノシティが実現される(crab waist 法)、

というものである。表 2 にイタリアの SuperB のパラメータの例を示す[4]。

もしもこの方法がうまくいくなら、少なくともハードウェアへの負荷が大幅に減り、ハードウェアに関する開発が不要となり(電流も低くパンチ長も長いので)、かつ運転コストも SuperKEKB に比べて大幅に安いなど(筆者のよ

うなハードウェア屋の立場からは、なにせ仕事が楽になるし、心配の種も少ないため)極めて魅力的な方式である。

表 2. イタリア SuperB と SuperKEKB のパラメータの比較

Parameter	Unit	SuperB	SuperKEKB
Energy	GeV	4 / 7	3.5/8
Luminosity	$10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1	0.53
Beam currents	A	1.9/1.9	9.4/4.1
$\beta_y^*$	mm	0.22	6/3
$\beta_x^*$	cm	3.5 / 2.0	20
$\varepsilon_y$	pm	7/4	240/90
$\sigma_x$	mm	6/6	5.5/3
Crossing angle	mrad	48	30
RF power	MW	20 ~ 25	80 ~ 90

Crab waist 方式自体はフラスカティ研究所の DAΦNE リングを使った検証(DAΦNE upgrade)が精力的に行われ、条件付きながらほぼ目標通りのルミノシティが達成出来ている[5]。(条件付き、という意味は、達成したルミノシティ自身は KEKB リングの現状の値と比べて決して満足いく値ではないからである。2 ページ前のルミノシティを決定する式で見ると、ルミノシティは電流、ベータatron関数、ビーム・ビームパラメータが同じ程度ならば、ビームエネルギー( $\gamma$ )に比例する。DAΦNE upgrade のルミノシティ目標値は  $5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であり、KEKB とのエネルギー比が約 10 倍、という点から見るとかなり低い(少なくとも  $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  位は出ても罰は当たらない)。つまり、いささか志(目標)が低すぎ=ビーム・ビームパラメータが低すぎ、はしないだろうか、という気がするからである。)

SuperB 加速器(および SuperKEKB 加速器)の構成では、crab waist 用六極磁石が作り出す強力な非線形効果を  $-I$  となるように配置したとしても、衝突点近傍のもつ非線形性の影響により、うまく打ち消すことは出来ず、ダイナミック・アパーチャがきわめて狭くなってしまい、使える(ちゃんと回る)optics 自体を未だ見つけることが出来ていない。また現技術で実現可能なハードウェア(磁石)に必要なだけの低ベータ衝突点の実現できるかどうか、特に( $\beta_y$  もすごい)  $\beta_x$  を絞れる衝突点の実現可能か不明であり、またそれらすべてがうまくいったとしてもビーム寿命がきわめて短く、非常に強力な入射器で入射し続けなければならないといった(ILC 並の衝突点なので当然)問題が山積しており、解決策の目処さえ立っていないものも多い。具体的な検討が進んでいる SuperKEKB と同じ土俵で議論できる段階まで到達していないのでは、という印象は否めない。

最近の検討傾向では、衝突点などのパラメータをゆるめ、パンチ長も短くし、蓄積電流も増加する方向の検討も始まっているようで、より現実的なパラメータへシフトしてゆく

ものと思われる。SuperKEKB でも、前述のようにもしも可能ならばより蓄積電流が少なくバンチ長が長いオプションに近づく検討も行われており、よい着地点があることを期待している。

#### 4. SuperKEKB に向けての開発研究

SuperKEKB の設計、検討については、現在衝突点を最重点的に進めており、今まで示したパラメータも日進月歩で変化している（かならずしもルミノシティがよくなっていくばかりではない）。そのため、現時点で衝突点周りの紹介をここするのはあまり意味がないと思われる。そこで、現時点でよく検討されていて、あまり変化しないと思われる真空チェンバー、および筆者のフィールドであるビームモニタシステムについて紹介したいと思う。

##### 4.1 真空チェンバーに関する開発研究

SuperKEKB では HER, LER とも KEKB リングより大幅に蓄積電流が増え、バンチ長は短くなる。それに従って陽電子リングの光電子不安定性、電子リングのイオン不安定も非常に強くなるため、真空チェンバー側での十分な対策が必須になる。また、真空容器から来るブロードバンドインピーダンス（大きいとバンチ伸長現象によりルミノシティが落ちる）、パラシティックロス（余計に RF パワーを浪費するだけでなく、真空容器、コンポーネントの破壊にもつながる）についても、現 KEKB よりも、より厳しい管理が必要となってくる。このため、以下の開発が進んでいる。

- アーク部の真空チェンバーは HER, LER ともアンテチェンバー型

アンテチェンバーで通常のビームパイプ壁より遠方で放射光を当てることは、極めて強力な放射光を処理するために必要（発光点からずっと遠くで壁に当てるため、放射光の鉛直広がり及び水平広がりの効果で壁での入熱の面密度が下がり、なんとか従来方法での冷却が可能となる）であるとともに、アンテチェンバー内に分布型ポンプを置くことで真空の圧力が平均化する利点（真空度が悪い場所が少なくなる）、フランジ、ベローズなどを保護するための放射光マスクやイオンポンプなどのポンプスロットがアンテチェンバー側に設置されるため、真空チェンバーのインピーダンスが大幅に下がるなど多くのメリットがある。特に LER については、放射光の直撃面からの光電子がビームまで届きにくくなるため、電子雲不安定を抑制する大きなご利益があり、HER についても真空度が悪いところが減るため、fast イオン不安定が起きにくくなるメリットがある。開発中の LER アーク部用アンテチェンバーの写真を図2に示す。



図2. 開発中のアーク部用真空チェンバー（LER 用）  
チェンバー内径は90mmで、現行チェンバーより4mmほど小さい。リング内側のスロットには分布型のNEG（非蒸発ゲッターポンプ）が入り、真空度向上に大きく寄与する。

- 大電流、強力なビーム電磁場に耐えうる真空部品の開発

ビームが真空チェンバー中を走行することにより、真空チェンバー内表面にはビームからの電磁場により強力な壁電流が流れる。また、真空チェンバー内に構造（段差など）があると、それにより乱されたビーム電磁場から放出された電磁場（wake field）がチェンバー内を伝搬してくる。これらの電磁場は、バンチ長の逆数程度までの高周波まで（数十GHz）の成分を持ち、バンチ電流の自乗に比例するパワーを持っているので、大電流、短バンチ長のマシンでは、まず真空部品がこれらの高周波に耐え、壊れないことが必須となる。また、自分が壊れないだけでなく、そこでビームエネルギーを無駄に失わないように、HOMを貯めないようにすることがリング全体のインピーダンスを下げることに必要である。現状で、真空チェンバーを接続するのに必要なベローズなどの開発がKEKBリングを使って進んでおり、すでに実用段階にある。インピーダンス管理についても、並列計算環境を用いた三次元電磁界計算が精力的に進められている。同時に、大きな影響があると考えられる可動マスクなどについては、試作品をKEKBリングにインストールして精力的な試験が行われている。

- 真空チェンバーの表面処理（LER）

陽電子リング（LER）では、放射光により発生した光電子がビームと相互作用し、バンチ結合不安定、バンチ内振動（head-tail 振動）などを引き起こす電子雲不安定性が大きな問題となる。これを抑制するためアンテチェンバーを使用すれば直撃放射光から放出される光電子を大幅に減らすことは可能だが、それでも反射光、迷光など直撃光の1/10ほどの光はチェンバー内面にほぼ一様に当たり、そこから光電子が放出される。この電子がビームにより加速され、再びチェンバーに当たるとき、当該電子エネルギーの二次

電子放出率  $\delta_{\max}$  が 1 より大きいと、電子数が増幅され、パンチ電流が大きい領域では電子雲不安定が起きてしまう。これを回避するため、真空チェンバー内表面処理を行うことにより、二次電子放出率を下げる研究が進んでいる。現在のところ、表面に TiN をコートすることにより、 $\delta_{\max} < 1$  が達成出来る見通しが立っている。図 3 に真空チェンバーに TiN コーティングをしている最中の放電の様子を下側ビューポートから見たものを示す。この処理を行ったチェンバーを実際に KEKB リングにインストールし、電子数が  $1/2 \sim 1/3$  に減少することが確認されている。

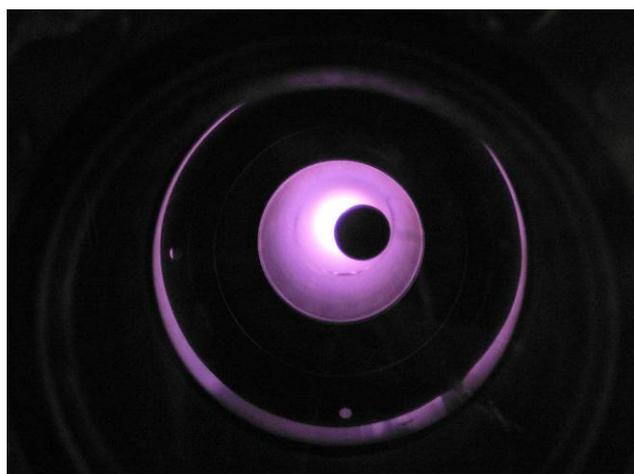


図 3. 真空チェンバー内面を TiN コートしている様子  
中心の黒丸に見える部分がチタンカソードである。

- 偏向電磁石部で電子雲密度を下げる  
特殊チェンバーの開発

アーク部の直線部（強い磁場がない場所）では、チェンバー外から弱いソレノイド磁場を加えることにより、今まで述べた対策を併用すれば電子雲不安定はほぼ抑制できる。しかしながら、偏向電磁石内では、強力な偏向電磁石磁場により電子雲が支配され、磁力線に沿って上下方向に電子雲がトラップされビームと相互作用すると考えられる（たとえソレノイド磁場があっても、偏向電磁石磁場に比べて無視できる程度なので、電子雲を抑えることは出来ない）。このため、偏向電磁石内では、さらに積極的に電子雲を減らす、あるいは出来た電子雲を吸収する、といった対策が必要となると考えられている。現在、有力な手段として 1) 偏向電磁石チェンバー内上（あるいは下）面に電極を設置して、電場をかけることにより電子雲を吸収する、2) 上（あるいは下）内面を深い溝（groove）がある構造とし、構造的に二次電子が発生しにくいものにする、という 2 案の R&D が KEKB-LER で実際のビームを使って進められている。

また、CesrTA 加速器においても、日米科学技術協力のもと、電子雲不安定性に関する実験が進められている[6]。図

4 に電子雲吸収用ストリップライン電極の写真を、図 5 に groove 付きチェンバーの写真を示す。LER ビームを使って電子数を測定した結果によると、単純に表面を TiN コートしただけで電子数は  $1/2 \sim 1/3$  になり、groove にするとさらに  $1/5 \sim 1/10$  になり、電極にするとそのさらに  $1/10$  になる、という結果が得られている。

真空チェンバーについては、少なくともアーク部は改造のための休止期間中にすべて交換する必要があるため、限られた期間ですべてのチェンバーを製造し、現チェンバーを撤去し、新チェンバーを設置するという必要がある。スケジュール的にも予算的にも極めて大変で重要な部分であり、本 SuperKEKB 計画の初期性能を決定する鍵を握っているとみえる。



図 4 電子雲吸収用ストリップライン電極  
ステンレス真空チェンバー表面にセラミックスを溶射し (0.2mm), その上にタングステンの電極を溶射 (0.1mm) している。



図 5 Groove チェンバー  
材質はステンレスで表面に TiN コーティングがされている。このチェンバーは、日米科学技術協力事業のもと、SLAC で製作され、KEKB に設置されてビームテストが行なわれた。

## 4.2 ビームモニター・フィードバック開発

極限にまで最適化された加速器のデザイン性能を、現実の(ランダムなエラー源を抱える)加速器でデザイン通り、あるいは出来るだけデザインに近く発揮させるためには、実際のビームからの情報を元に各種のエラーソースを解析して補正する(ビームに聞く)作業の繰り返しは欠かせない。そこで、ビームを測定するビームモニターに求められる性能も、自然厳しいものになる。

### • ビーム位置モニター電極開発

前述のように、アーク部の真空チェンバーはすべてアンテナチェンバーになる。また、パンチ長も短くなり、全電流も増える。対策として、1)電極サイズを小型化することで、ビームから侵入するパワー、ビームとの結合インピーダンスを下げ、電極自身の trapped mode に対しても低減化の対策をする、2)高周波応答がよいフィードスルーを採用し、ビーム信号の高周波化に対応する、3)製造コスト削減およびメンテナンス性を向上するためフランジ結合型の電極にする、という3点を基本に開発を進めている。電極の応答、trapped mode、インピーダンスについても、三次元電磁界計算による検討を進めている。図6にKEKB日光直線部に試験的にインストールされた位置モニターチェンバーの写真を示す。

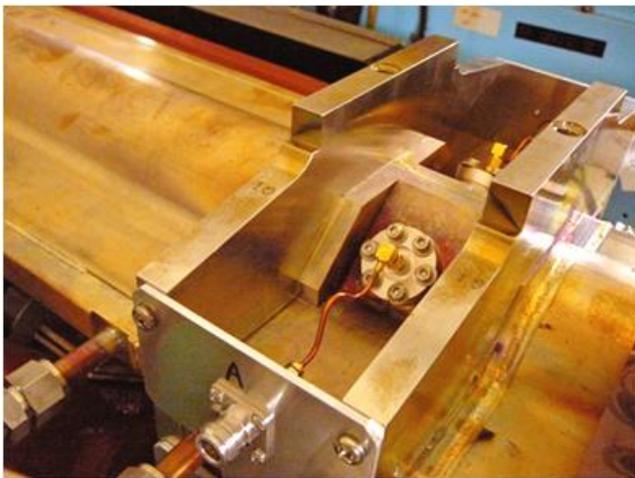


図6 日光直線部に設置されたアンテナチェンバー用ビーム位置モニター

### • ビーム位置検出回路開発

真空チェンバーがアンテナチェンバーとなったため、真空チェンバーの中をビームからの電磁波が導波管モードで伝搬するカットオフ周波数が下がり、1GHz以下になる。このため、KEKBで使用してきたビームのRF二乗成分(1GHz)を検波する位置検出回路は使用出来なくなるので、新たに現在の回路技術のもと、509MHzを検出するビーム位置検出回路の開発を行っている。KEKB開発時と比べて

エレクトロニクス、特にDSP(Digital Signal Processor:超高速の[浮動小数点の]乗算器)、FPGA(Field Programmable Gate Array:書き換え可能な高速高密度ロジック素子)の進歩が大きく、デジタル信号処理系に関しては遙かに高速に、高精度に信号処理を行うことが出来るようになったが、高周波信号処理部に関しては、回路の性能を決めてしまう部分でもあり、依然大変やっかいな場所であることは変わりなく、素子の選択を含めた困難な開発が続いている。

また、SuperKEKBでは、軌道光学測定のため、現KEKBよりもより時間領域での位置信号測定(turn-by-turn位置モニター)が必要になるといわれている。特に、大電流ビームを蓄積したまま特定の衝突していないパンチだけを使ってビーム位置情報(位置、ベータatron位相の進み)を測定することが実際の大電流で衝突時の軌道光学測定、補正のために要請されている。このため、パンチトレインの中から特定のパンチ信号だけを切り出す高速信号ゲート回路(汎用と特殊測定用の超高速版の2種類)、その信号からビームの位置を周回毎に測定するturn-by-turn測定回路、特定のパンチだけをベータatron周波数で励振する励振回路の開発が進んでいる。図7に超高速ゲート回路により切り出されたボタン電極信号の例を示す。

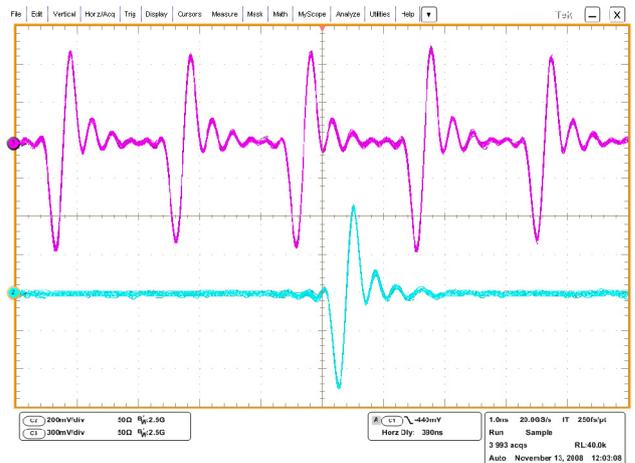


図7 パンチトレイン信号(上側トレース)とゲート回路により切り出された信号(下側) パンチ間隔は2nsである。

### • X線を用いたビームサイズ測定モニター開発

KEKBリングでは放射光の可視光成分をダブルスリット干渉計で測定することで、水平、鉛直方向のビームサイズをリアルタイムに正確に測定することが可能となり、ルミノシティチューニングに大きく寄与した。SuperKEKBでも干渉計は鉛直方向エミッタンスが非常に小さくならない限り依然有効であるが、これに加えて、放射光のX線領域を用いてビームサイズを直接、しかも将来的にはパンチ毎に測定出来る“coded aperture mask”を使ったサイズモニ

ター開発を日米科学協力事業のもとで進めている[6]。現在、日本側で製作した X 線マスクを C<sub>esr</sub>TA 加速器の X 線ビームラインに設置して、超低エミッタンスビームの測定実験が行われている。また、読み取り系に関しては、ハワイ大学のグループと協力して開発が進められている。

#### ● 次世代バンチフィードバックシステムの開発

現 KEKB リングでもバンチ結合不安定が予想外に強力で、横方向（水平、鉛直方向）に関しては個別バンチフィードバックシステムなしでは非常に少ないビーム電流しか（ $< 50\text{mA}$ ）蓄積できないが、SuperKEKB においては、リングのインピーダンスがより削減できたとしても、より大電流、短バンチ長のため、横方向のみならず、進行方向にもバンチ結合ビーム不安定が発生すると推定されている。また、バンチ間隔に関しても、 $2\text{ns}$  間隔が基本となるため、現行システムより時間的にキレがよいことが必要となる。さらに、フィードバックシステム自体がビームにもたらすノイズ成分が衝突時のビームサイズ、特に鉛直方向のビームサイズに悪影響をもたらす現象が明らかになりつつあることもあり、フィードバックシステムへの要請は KEKB よりも遙かに厳しいものがある。

このような次世代フィードバックシステムへの要請を満たすため、日米科学技術協力事業のもと、SLAC のフィードバックグループと共同で次世代バンチフィードバックシステムの開発を進めてきた[6]。はじめに高速 FPGA を使ったバンチフィードバック用汎用デジタル信号処理回路システムの開発を行った。ここで開発された iGp は、(1) ほとんどすべてのハーモニックナンバーの加速器（最大周波数  $550\text{MHz}$  以下）で使用可能で（奇数ハーモニックナンバー：たとえば C<sub>esr</sub>TA でも使用実績がある）、(2) 一枚の基板に ADC、FPGA、DAC およびデータ蓄積用のメモリー（ $8\text{MB}$ ）が載った all-in-one システムで、(3) 最大 16 tap FIR（finite impulse response）フィルターまで実現可能で、(4) 周回周波数に比べてずっと遅いシンクロトロン振動に対応するため、進行方向フィードバック用のダウンサンプリング（間引き）機能を含み、(5) フィードバック動作に影響を及ぼさずにデータ取得が可能で、またトリガーに合わせたフィードバック係数の瞬時入れ替えが可能（なので、ある時間までフィードバックを OFF にして、その後 ON にする grow-damp 実験が可能）な、汎用フィードバックフィルターである。このシステムは KEKB をはじめ、KEK-PF、DA NE、LBNL-ALS で進行方向、横方向フィードバックで実用運転されており、BEPc-II、C<sub>esr</sub>TA などでも導入のための試験実験が行われ、十分機能することが証明されている。図 8 に iGp の基板（SLAC 版）の写真を示す。

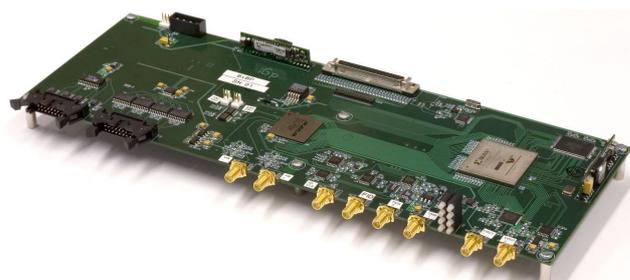


図 8. iGp 基板の写真

この iGp を使用することで、不安定を抑制できるだけでなく、grow-damp 実験により不安定のモード特定が容易にでき、不安定源の探索に絶大な威力がある。図 9 に KEK-PF リング進行方向フィードバックの ON/OFF 時、ストリークカメラで測定したビームの情報を示す。図の上下方向がビーム進行方向で、フィードバック OFF（左図）ではバンチ毎に大きく位置が前後しており、進行方向不安定が起きていることが分かるが、フィードバック ON（右図）ではバンチ重心がきれいにそろい、不安定が抑制されていることが分かる（もっと細かく見ると、右図でもバンチ長がバンチ毎に長くなったり、短くなっていることが分かる。これは四極振動が残っていることを示しており、通常のバンチフィードバックシステムではちょっとお手上げである）。

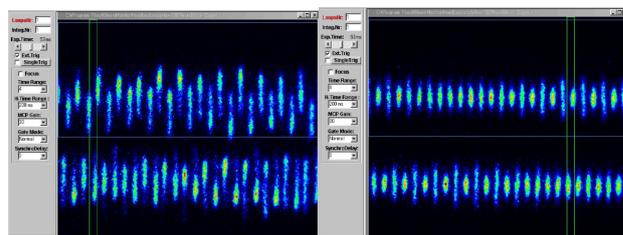


図 9. KEK-PF リングビーム進行方向のストリークカメラ画像  
左が進行方向フィードバック OFF、右が進行方向フィードバック ON の場合のものである。

これに加え、現在、バンチ位置検出系の性能向上のための共同研究を進めており、試験回路の製作、加速器を使った試験が iGp の試験と並行して進められている。

SuperKEKB に向けては、ここで紹介したもの以外にも数多くの極めて重要で、かつ困難な開発が続けられている。たとえば、衝突点では現在よりずっとベータatron 関数を絞らなければならない、それに必要な特殊磁石群（超伝導電磁石など）の設計、開発、最適化が必要である。現在より遙かに巨大な電流を安定に保持するためには、現在の高周波加速システムを大きく増強するとともに（当然巨額の費用が必要となる）、加速空洞に関しても（現在とは最適点が変わってくるので）各種の構造変更が必要になると思われ、そのための検討、開発が行われている。電流増加に伴い、

異常時にビームを1ターン以内に蹴り出すアポートシステムの立ち上がりに必要なアポートギャップがあることによる悪影響(たとえば transient beam loading)が急激に増加するため、より速い立ち上がりのアポートシステムの開発も必須である。大電流ビームがアポート時に通過するアポート窓の開発も必要である。高いルミノシティを出すのに必要なクラブ空洞に関しても、現有のものをそのまま使い続けることは困難と思われ、より大電流に対応し、かつ出来ればより大きな電場が出るものが望ましく、検討が続けられている。入射器についても、より陽電子強度を増強すること、今のままのエミッタンスでは衝突点が厳しくなる(特に陽電子)ため、ダンピングリングを設置してエミッタンスを下げることも検討している。もっと実際的な問題として、冷却水などの施設の老朽化の問題(トリスタン時代からの施設を使い続けているため)、大電流化により廃熱が増大するための施設増強が必要となる(これらも大変大きな出費と時間が必要な作業である)。これらのうち、たとえば運転開始後年次計画で順次増設してゆくことが可能なもの(たとえば高周波加速空洞の追加など)もあれば、改造休止期間中(たとえば3年間とか)にやっつけなければ後からではできないものなどがあり、それに応じて現時点での検討のプライオリティが変わるが、いずれにしても各グループで精力的な検討が続けられている。

## 5. まとめ

SuperKEKB パラメータについて、まずどうすればルミノシティを上げることができるかを定性的に紹介し、本計画で採用する方針をイタリアの SuperB 計画と比較して紹介した。計画実現に向けて現在進んでいる R&D のうち、真空チェンバーおよび真空部品開発とモニター開発の一部のトピックスについて紹介した。

筆者はこのモニター・フィードバックシステム開発を行っているハードウェア屋で、ヒドイことに計画の全容をちゃんと把握してはならず、また衝突型加速器の深奥なビーム物理学についても正しく紹介する知識がまったく不足しており、必要なことを正確に紹介できたか極めて怪しいことをお詫びする(正直言って、このような紹介を行うことに関して極めて不適任であると断言できる)。また、計画実現に向けて、現時点でもパラメータが日進月歩で大きく変わっており、ここで紹介したパラメータがあっという間に黒歴史に封じられる可能性もある。しかしながら、SuperKEKB 計画全体は、(ひいき目かもしれないが)他の将来計画と比べても実現性が極めて高く(不足な要素が少ない)、近い将来スタートしても、運転開始後比較的近い時期に目標を達成出来るだろうと確信している。

本稿作成においては、多くの方に資料、データを提供していただきました。特に、小磯晴代氏、船越義裕氏、大見和史氏、末次祐介氏、柴田恭氏、江川一美氏には本文を読んでいただいて、多くの不備、大間違い、などご指摘いただきました。感謝します。

## 参考文献

- [1] 大西幸喜「ルミノシティフロンティア」OHO'04 テキスト。
- [2] K. Abe, *et al.* "Letter of Intent for KEKB Super B Factory," KEK Report 2004-4.
- [3] P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, 2006.
- [4] M. E. Biagini, "SuperB-Factory Accelerator Project Overview," Japan-Italy Collaboration Meeting "Crab Factories", Frascati, 2008.
- [5] C. Milaardi, "DAFNE Achievements with Crab Waist Collision Scheme," Japan-Italy Collaboration Meeting "Crab Factories," Frascati, 2008.
- [6] 高エネルギー分野における日米科学技術協力事業「次世代高ルミノシティコライダーのための開発研究」代表：生出勝宣(KEK), John Seeman(SLAC).