

特集1 KEKB B ファクトリー

SuperKEKB 計画

船越 義裕*

SuperKEKB Project

Yoshihiro FUNAKOSHI*

1. はじめに

現在稼働中の KEKB は、2009 年度いっぱいまで運転を終了し、2010 年度からはアップグレードのための建設工事に入ることが計画されている。このアップグレード計画は SuperKEKB 計画と呼ばれている。本稿の目的は、この SuperKEKB 計画の主に加速器の概要を説明することである。SuperKEKB 計画については、既に 2004 年に Letter of Intent (LoI) の形でまとめられている¹⁾。より詳細な情報を知りたい方は、こちらを参照していただきたい。加速器の設計においては、LoI 以降多少変更があったので、本稿では変更点についても説明を行う。

2. SuperKEKB の必要性

KEKB/Belle が目標とした物理は、小林益川理論の検証であった。2001 年に報告された B 中間子系での CP-Violation の発見やその後の測定等で、この大目標は達成されたと言える。この小林益川理論は、素粒子理論の標準モデルの構成要素であり、その意味で KEBB/Belle は標準モデルの検証を行ったことになる。これに対して、SuperKEKB では、標準モデルを越える“new physics”が研究対象になる。いくつかの傍証から TeV エネルギー領域に“new physics”が存在する可能性が示唆されているが、その場合、十分なルミノシティを溜めれば、B Factory でもこの“new physics”が検出でき、しかも“new physics”をもたらす物理モデルが正しいのかを検定できる可能性があることが示され、そのために必要な積分ルミノシティは、 50 ab^{-1} 程度と見積もられている¹⁾。2008 年末までに、Belle 検出器が蓄積した全積分ルミノシティはほぼ 0.9 ab^{-1} である。現在の KEKB は年

間に 0.2 ab^{-1} 程度の積分ルミノシティを供給できる能力があるが、これでは 50 ab^{-1} を供給するのに 250 年かかる計算になり、不可能である。そこで、ルミノシティを大幅に向上させる SuperKEKB が必要になる。

3. ルミノシティ向上のアイデア

現在の KEKB のピークルミノシティの記録は $1.76 \times 10^{34} \text{ cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ である。これに対して、SuperKEKB では $5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度のルミノシティを目指している。このルミノシティは、KEKB の最高値の 30 倍程度であるので、単純計算では上記の 250 年が 9 年足らずに短縮され、現実的になる。この高いルミノシティをどういう方法で達成しようとしているかを以下に説明する。ビームビーム効果が強い制限を与えるコライダーではルミノシティはよく知られた以下の式で記述される。

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \left(\frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \right) \left(\frac{R_L}{R_{\xi}} \right) \quad (1)$$

ここで、 γ は Lorentz factor, r_e は古典電子半径、 σ_x^*, σ_y^* は衝突点の水平、垂直ビームサイズ、 I は全ビーム電流、 ξ_y は垂直方向の beam-beam parameter, β_y^* は衝突点での垂直方向のベータ関数、 R_L, R_{ξ} はそれぞれ、ルミノシティと ξ_y の reduction factor である。添字の $\pm$ は、陽電子 (+) または電子 (-) についてのパラメータであることを示す。この式は二つのビームで、 σ_x^*, σ_y^* は等しいことを仮定している。reduction factor は二つのビームの有限交差角と hourglass effect に由来するものであるが、通常 1 に近い。また、 σ_x^* と σ_y^* の比の項は、通常用いられるフラットビームでは無視できる。(1)式より、ルミノ

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

表 1 KEKB と SuperKEKB の主要デザインパラメータの比較：SuperKEKB は最新のものではない。L/H は LER (Low Energy Ring) および HER (High Energy Ring) を表す

	KEKB Design	SuperKEKB Design
β_y^* (mm)	10	3
ξ_y	0.052	0.296
I_{beam} (L/H) (A)	2.6/1.1	9.4/4.1
R_{ξ_y}	0.885	1.11
R_L	0.845	0.860
Luminosity ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1	55
σ_z (mm)	5	3

シティは、ほぼ I と ξ_y と β_y^* で決まることがわかる。この式は電子、陽電子のどちらのパラメータを用いても成り立つが、設計段階では ξ_y と β_y^* は二つのビームで等しく取り、 γI の積を二つのビームで等しくなる様に（つまり I はビームエネルギーに反比例する様に）取ることが多い。最新のマシンパラメータでは、上記の二つのビームサイズが衝突点で等しいという条件を破っている（その理由は後述する）が、説明が複雑になり見通しも悪くなるので、ここではしばらく前のパラメータでルミノシティ向上のアイデアを説明する。表 1 に KEKB と SuperKEKB のデザインパラメータを比較して示す。表 1 から分かる様に、KEKB と比較すると、SuperKEKB では、 β_y^* で約 3.3 倍、 ξ_y で（reduction factor を考慮すると）約 4.5 倍、ビーム電流 (I) で約 4 倍、それぞれルミノシティが向上し、合計で 50 倍以上のルミノシティの向上になる。次に、これら三つの基本パラメータについて説明する。

まず、 β_y^* であるが、この基本 3 パラメータのうち、KEKB で最初に達成されたのがこの β_y^* で、現在の KEKB では 5.9 mm 程度まで β_y^* を絞ることができている。 β_y^* を絞ることの直接の障害は、chromaticity 補正のための非線形磁場による dynamic aperture の減少であるが、衝突点付近の設計をやり直すことにより、 β_y^* を 3 mm まで絞ることは充分可能であり、更に絞ることもできる。しかしながら、 β_y^* を絞ることに対する制限は、絞ることそのものより、絞った効果が所謂 hourglass 効果により飽和することにある。すなわち、 β_y^* はリングの場所の関数であり、衝突点（ビームの衝突の中心）で小さくしてもバンチ長（ σ_z ）の範囲で大きくなってしまい、（平均的には）絞った

ことにならない場合がある。 β_y を衝突点からの距離 s の関数で書くと、

$$\beta_y(s) = \beta_y^* + \frac{s^2}{\beta_y^*} \quad (2)$$

となるが、この式から分かる様に、例えば衝突点から β_y^* の距離だけはなれた場所では、 β_y は β_y^* の 2 倍になる。この hourglass 効果により、KEKB での経験からも β_y^* をバンチ長より小さくしても、ルミノシティはあまり上がらないことがわかっている。従って、 β_y^* を絞るためにはバンチ長を短くする必要がある。バンチ長を短くする上での制限は、一つには短バンチでは高次モードによる発熱などで真空機器が壊れたりすることから来る。これもかなり大きな問題であるが、もう一つバンチ長を縮めること自体が困難な場合がある。後述する様に、CSR の問題で LER のバンチ長を 3 mm にすることが困難であることが最近分かって来た。表 1 のパラメータはその問題が発覚する前のものである。ともあれ、SuperKEKB ではバンチ長の制限から、 β_y^* の最小値が決まる。

次に、ビーム電流 (I) であるが、ビーム電流は、主に 1) 真空機器のビームに対する耐性、2) ビーム不安定性、3) RF 空洞システムが供給しうる RF パワー、等で制限される。基本 3 パラメータのうち、KEKB で当初実現が最も困難に思われたのは、このビーム電流である。実際、KEKB では非常な苦勞をしながらビーム電流を増やして来た。1) の問題では、真空機器が高次モードや放射光、またはビームの直接衝突等で、次々に壊れる事態が発生したが、各機器の改良やインターロックの強化等により、何とかデザイン電流を保持できるレベルまで達している。SuperKEKB では、KEKB の設計値の約 4 倍の電流が必要で、バンチ長も短くなるため、大電流を保持するのが更に難しくなるが、KEKB で問題になった問題に対処するために、これまでに進められて来た真空機器や RF 空洞の R&D により、この大電流ビームの蓄積の目処がほぼ立ったといえる状況にある。次に、2) のビーム不安定性については、KEKB のデザイン段階で非常に懸念された RF 空洞の高次モードや基本モードによる不安定性は、ARES や高次モードを damp した超伝導空洞の開発と基本モードによる不安定を抑制するための RF フィードバックおよび transverse 方向の dipole mode の結合バンチ不安定性を抑制するためのビームフィードバックの開発により、KEKB のデザインビーム電流をほぼ蓄積できることが示されている。但し、バンチ間隔が最小の状態（全

ての RF バケットのバンチを積める場合) では, transverse 方向の不安定性が強くビームフィードバックで押さえ込むことができていない. また, dipole mode の不安定性ではないが, 陽電子リング (LER) の電子雲による不安定性で, 垂直方向のビームサイズが大きくなるという現象があり, この現象のために現在の KEKB では, LER のビーム電流を 1.7 A 程度より増やしてもルミノシティが増えないという状況にある. KEKB の LER のデザインビーム電流の 2.6 A を蓄積することは可能と思われるが, この現象のために 2.0 A 程度までしかテストされていない. これらのビーム不安定性の問題も, SuperKEKB では更に厳しくなることが想定されるが, これに対処すべく様々な R&D が進められている. 最後の 3) の RF 空洞システムが供給する RF パワーについては, これが最終的なビーム電流の制限を与える. SuperKEKB では, RF 空洞システムが供給するパワーを増やすために, ARES に関しては, 1 空洞を 1 つのクライストロンでフィードする様にする (KEKB では基本的に 2 つの ARES 空洞を 1 つのクライストロンでフィードしている). また, スペース的に可能な限り空洞の台数を増やす. また, LER のウイグラー電磁石の台数を減らすことで, スペースを確保するとともにビームが放射光放出で失うエネルギーを減らして, RF 空洞によるエネルギー供給の必要量を減らす等の努力をする (但し, その結果放射減衰時間が長くなり, ルミノシティが落ちることになるので, 減らす量にも限界がある). 以上が大電流ビームに伴う問題点と, 解決の方法である.

最後に, もう一つの基本パラメータである beam-beam parameter (ξ_y) について, これを増やすアイデアについて説明する. 従来の電子, 陽電子の衝突型加速器では, ξ_y は (LEP のように衝突頻度と比較して放射減衰率が高い特殊なマシンを除いて) 0.05 程度が最大であるとされて来た. しかし, 最近の計算機シミュレーションの進展により, 思わぬ可能性が存在することが最近分かった²⁾. すなわち, 水平方向のベータトロン振動数が半整数に非常に近い場合は, 正面衝突またはそれを実効的に作り出すクラブ交差の衝突方式を用いると, 非常に高いビームビームパラメータ ($\xi_y > 0.1$) を達成できる可能性があることが示されたのである. 現在, KEKB でクラブ空洞を導入しシミュレーションが预言する高い ξ_y が, 実際に達成できるかどうかテスト中である³⁾. クラブ空洞導入前の ξ_y の最高値は 0.058 程度であったが, クラブ空洞導入後は 0.09 に達している. しかし, シミュレーションで

は, 現在の KEKB では 0.15 まで ξ_y を上げることが可能であることが示されており, その数字まではまだ遠いといえる. SuperKEKB では, 相手のビームがない場合の global x-y coupling の改善や水平方向のベータトロン振動数をさらに半整数に近づけること等により, ξ_y が 0.3 まで上がることがシミュレーションでは预言されている. しかしながら, 現在の KEKB で ξ_y がシミュレーションの値まで達していないことから, SuperKEKB の基本 3 パラメータのうち, この ξ_y が最も不確実なものといえる. SuperKEKB のコミッショニングでも, 大きな困難が予想される.

4. イタリアの Super B Factory

KEKB は SLAC の PEP-II と激しい競争を演じ最終的に勝利したが, SuperKEKB の対抗馬としてイタリアで Super B と呼ばれる計画が進行中である. この計画は, SuperKEKB とは異なったアイデアで高いルミノシティを得ようとしている. 以下に, そのアイデアについて簡単に説明する. というのは, SuperKEKB 計画の一つのオプションとして, このイタリア方式も検討することが, 最近決まったからである. (1) 式において, β_y^* を極端に小さな値まで絞ることを目指すのがこの方式である. β_y^* を小さくする上での主要な問題点は, 既に述べた様に hourglass 効果である. この方式では, 以下に説明する方法でこの問題を解決している. 図 1 に示す様に, この方式では水平方向のビームサイズも極端に絞り, かつ水平方向の交差角をつける.

そしてバンチ長に比べて, ビームの交差部の長さが極端に短く, hourglass 効果はこの交差部の長さに対して考えればよいので, 極端に β_y^* を絞ることが可能になる. この方式だと, 粒子のすれ違いが増えてルミ

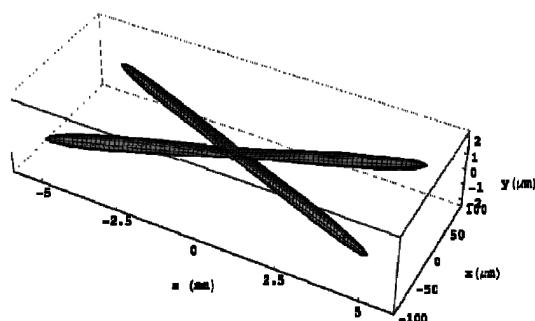


図 1 イタリア方式でのビーム交差の様子. 従来と比べて, 水平, 垂直両方向とも極端にビームを絞り, 水平交差角もつけることで, 二つのビームの交差部の拡がりを小さくして, hourglass 効果を避ける.

ノシティが上がらない様に思えるが、上記の様に水平、垂直の両方向ともビームサイズを極端に絞っているため、ルミノシティは落ちず、(1)式の ξ_y も従来と同じぐらいの値に達することが可能で、 β_y^* を絞った分だけルミノシティが上がることになる。この方式で、重要とされているのは crab waist という方式を取り入れることである。やや細かい話になるが、これもある種の hourglass 効果を避けるためのものである。衝突点で水平方向にずれた粒子は、相手のビームの中心と交差する位置が（交差角のために）進行方向にずれることになる。この進行方向のずれは、水平方向のビームサイズが小さいので比較的小さいが、 β_y^* が小さいために無視できない量になる。通常の hourglass 効果は、（各粒子の）バンチ内の進行方向の位置に依存して相手のビームの中心と交差する位置が進行方向にずれることによるが、この場合の hourglass 効果はバンチ内の水平方向の位置に依存して相手のビームの中心と交差する位置が進行方向にずれることによって生じる。この種の hourglass 効果を避けるのが crab waist で、6 極電磁石を用いて水平方向の位置に応じて自分のビームの β_y の最小の位置（waist）を（進行方向に）ずらすことにより、相手のビームの中心と交差する位置に合わせるのが crab waist である。この crab waist はイタリア方式では結構重要で、この crab waist がないとルミノシティが半分程度に落ちるとされている。表 2 に SuperKEKB とイタリア方式の Super B のパラメータの比較を示す。表 2 から分かる様に、もしイタリア方式が実現可

能なら、より低いビーム電流でより高いルミノシティが得られる、ランニングコスト（電気代）が安い、等幾つもメリットがあることがわかる。

イタリア方式の問題点は、従来の常識から考えると非常識なほど β_x^* や β_y^* を絞り込んでも充分なダイナミックアパーチャーを確保できるか、極端な低エミッタンスビームが実現可能か、またアンペアクラスのビーム電流でもエミッタンスの増大を防げるか、などである。イタリア方式では、建設コストも低く抑えることができる可能性があることもあり、SuperKEKB でも一つのオプション（可能性）として、イタリア方式の設計も検討することがごく最近決まった。現在のところ、SuperKEKB の場合 LER の偏向電磁石を長いものに取り替えることにより、LER のみ極低エミッタンス ($\epsilon_x \sim 1$ nm) にすることを考えている。また、衝突点付近の設計の検討も開始された。

5. 最新の SuperKEKB の設計

ここでは、イタリア方式は忘れて、本来の SuperKEKB の最新の設計について述べる。そのマシンパラメータを表 3 に示す。

表 3 のパラメータは、表 1 と表 2 のものとやや異なる。基本 3 パラメータについて見てみると、ビーム電流は変わっていないが、 β_y^* については、LER の値は変わっていないものの、HER の値は以前の 3 mm から 6 mm へと大きくなっている。これは、LER のバンチ長が以前の設計値の 3 mm まで短くすることができず、5 mm 程度になってしまうことに由来する。まず、この LER のバンチ長が短くできない理由について説明する。LER では CSR (Coherent Synchrotron Radiation) と呼ばれる現象の効果が従来考えられていたより顕著であることが、最近のシミュレーションで分かってきた。この CSR は文字通りの意味では、バンチ内の各粒子が個々に放射光を出すのではなく、全体がマクロチャージのように見えて、巨大なエネルギーロスをもたらすことであるが、そこまで至らなくても microwave instability によって、バンチ内の粒子のエネルギー広がりが増えたりバンチ長が伸びたりする現象が起こる。この CSR が起こるメカニズムは、バンチが曲線部で曲げられる際に放出する放射光が直進するのに対して、バンチは曲線運動するためバンチの後ろの方の粒子が放出した放射光がバンチの前の方の粒子に追いついて力を及ぼすという過程で説明される。この CSR のために、LER ではバンチ長を 3 mm に設定しても、大きく伸びて 5 mm 近くになり、またバンチ内のエネルギー広がりも大きくなっ

表 2 イタリアの SuperB と SuperKEKB の比較

Parameter	Unit	SuperB	SuperKEKB
Energy	GeV	4/7	3.5/8.0
I_{beam}	A	1.85/1.85	9.4/4.1
β_y^*	mm	0.22/0.39	3/3
ξ_y		0.15/0.15	0.296/0.296
β_x^*	cm	3.5/2	20/20
ϵ_x	nm	2.8/1.6	18/18
RF power	MW	20~25	80~90
Luminosity	$10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.0	0.55

表 3 SuperKEKB の最新の設計パラメータ

Parameters		LER/HER	Units
Emittance	ϵ^x	24/18	nm
	ϵ_y	0.24/0.09	nm
Beta at IP	β_x^*	200/200	mm
	β_y^*	3/6	mm
Bunch length	σ_z	5/3	mm
Trans. damping time	τ_d	60/40	ms
Tunes	$\nu_x/\nu_y/\nu_s$	.505/.5905/.025	
Beam energy	E_{beam}	3.5/8.0	GeV
Beam current	I_{beam}	9.4/4.1	A
Number of bunches	N_b	5018	
Crossing angle	2ϕ	30→0 (crab)	mrad
Beam-beam parameter*1	ξ_x	0.182/0.138	
	ξ_y	0.295/0.513	
Beam-beam reduction	$R_{\xi x}$	0.99	
	$R_{\xi y}$	1.11	
Luminosity reduction	R_L	0.86	
Luminosity	L	5.3×10^{35}	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

*1: ignore effects of traveling focus

て、物理実験に支障を来すことになる。バンチ長の設定を 4 mm 程度にすると、バンチ長は 5 mm 程度になり、エネルギー広がりとはそれほど大きくなる。HER はビームエネルギーが高く、バンチ電流も低いので、この CSR はほとんど問題にならない。シミュレーションの結果、この CSR の現象は momentum compaction factor (α) を負に取った方がやや弱いことが分かったので、現在はこの α を負に取るという設計になっている。但し、negative- α を採用しても LER のバンチ長を 5 mm 以下にすることは困難である。この場合、長い方の LER ビームの（進行方向に）中心からずれた粒子は相手のビームの中心と（本来の）衝突点と大きくずれたところで交差するので、hourglass

lass 効果が厳しくなる。この効果を緩和する方法として、traveling focus という手法がある。これは、バンチ内の進行方向の位置に応じて衝突点付近で β_y の最小の位置 (waist) をずらして、どの粒子も相手のビームの中心と交差する位置に waist が来るようにするというものである。この traveling focus を実現するために、crab 空洞と 6 極電磁石を組み合わせる。つまり、crab 空洞によって進行方向の位置に応じて水平方向の位置の違いを作り、その水平方向の違いに応じて 6 極電磁石で収束力の違いを作るのである。最新の設計では、この traveling focus を LER に導入することが考えられている。一方、HER は自分のバンチは短い、長い LER ビームと交差する間に自分の β_y が大きくならない様に、 β_y^* を大きく取る必要がある。また、その結果 HER の ξ_y が数字上大きく出ている。

6. アップグレードの概要

以上、SuperKEKB のマシンパラメータについて長々と書いたが、このマシンパラメータを実現するためにどのような改造が必要かを述べる。図 2 にアップグレードの概要を示す。ここでも、基本 3 パラメータに沿って必要なアップグレードについて説明する。

6.1 衝突点付近の改造 (β_y^* を絞るために)

SuperKEKB では β_y^* を 3 ~ 6 mm まで、 β_x^* を 20 cm まで絞りこむことを想定している。

現在の KEKB は、 β_y^* は 6 mm、 β_x^* は 90 cm 程度で運転されており、SuperKEKB のパラメータを実現するためには改造が必要である。一般に、ベータ関数を衝突点でより絞るためには、衝突点付近の 4 極電磁石をより衝突点に近づけ、強さも強くする必要がある。そのための電磁石の配置や電磁石の設計や R&D はかなり進んでいる。水平方向のビーム交差角は、KEKB では 22 mrad であったが、SuperKEKB では 2 つのリングを衝突点付近で素早く分離し、4 極電磁石をより衝突点に近づけるために 30 mrad に取っている。また、SuperKEKB で重要なのは、水平方向のベータatron振動数が半整数に非常に近いために、相手のビームによる収束力の影響が非常に強く、衝突状態では水平方向のエミッタンスは極端に増大し、衝突点でのベータ関数 (β_x^*) は極端に縮み、衝突点付近では逆に極端に大きくなる。この効果のために、衝突点付近で水平方向のビームサイズや放射光の拡がりや極端に大きくなり、それらを避けるために衝突点付近の電磁石のアパーチャーは非常に広く取る必要があり難くなる。現在までのところ、 β_x^* を 20 cm まで絞

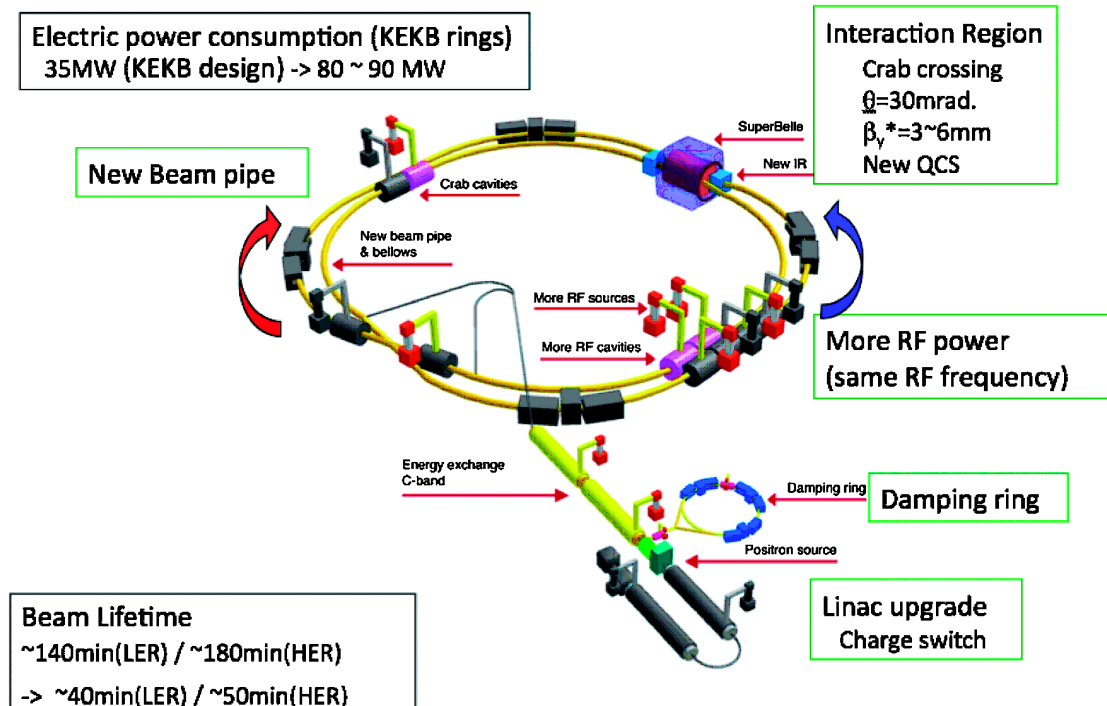


図2 SuperKEKB へのアップグレードの概要

りこむ設計は存在せず 40 cm 程度が限界である。 β_x^* が 40 cm の場合、ルミノシティが 2 割程度落ちるとされており、今後 20 cm の設計に成功しなければ、ルミノシティロスにつながる。なお、衝突点付近の 4 極電磁石はアパーチャーを稼ぐために全て超伝導電磁石にする予定である。この他、衝突点のビームパイプの設計、Belle 検出器が感じるバックグラウンドノイズの見積もり、Belle 検出器を守るための放射光を吸収するマスクの設計も進んでいる。次のステップは、具体的な組み立て手順の確立やサポート等の設計である。

6.2 大電流ビームの蓄積

ビーム電流を大幅に増やすために必須なのは、まずビームにエネルギーを供給する RF システムの増強である。SuperKEKB では、ARES 空洞やクライストロンの台数を大幅に増やす予定である。LER では、ARES 空洞の台数は 20 台から 22~24 台に増やし、クライストロンの本数は現行の 10 本から 22~24 本に増やして、ARES 空洞 1 台を 1 つのクライストロンでフィードすることにより、ビームに供給できる RF パワーを大幅に増強する。HER では、ARES 空洞の台数を現行の 12 台から 16~18 台に増やし、クライストロンも 6 本から 16~18 本に増やす。但し、超伝導空洞の台数は現行の 8 台のままの予定である。また、RF 空洞はそれ自身がビーム不安定性の原

因になりうるので、その対策が必要である。LER の ARES では空洞間の結合を変更する改造により貯蔵空洞に蓄積されるエネルギーを増やして、ビームローディングによる detuning の量を減らす。これにより、基本モードによる不安定性を軽減できる。また、この基本モードによる不安定性を抑制する RF フィードバックの改良も必要である。但し、これらの改良を行っても、基本モードの寄生モードによる不安定性は残り、これは (KEKB では不要であった) 縦方向のビームフィードバックで抑制する必要がある。この他、RF 空洞系では、大電流、短バンチが作る強い高次モードのパワーに対する対策が必要で、HOM 吸収体の性能向上やロスファクターを下げるための空洞構造の改良の R&D が進んでいる。

次に、大電流ビームの蓄積のためには、真空チェンバーや真空機器の改良が重要である。この真空系のアップグレードでは、二つのポイントがある。すなわち、壊れたりせずに大電流ビームを安定に蓄積することと KEBB で問題になっている電子雲によるビームのブローアップを抑制することである。この二つの目的を満たすために、まず両リングの真空チェンバーを作り直してアンテチェンバー (ante-chamber) と呼ばれる構造のものに取り替える。このアンテチェンバーは、ビームが通るチェンバーの横にスリットを介して側室のような構造のチェンバーを取り付け、ビー

ムが放出した放射光をそのアンテナチャンバーで受けるという構造になっている。これにより、放射光は通常のチャンバーで受ける場合に比べて垂直方向、ビームの進行方向とも受ける長さが大きく広がるので、大きなパワーの放射光の熱処理が可能になる。また、電子雲の原因の一つである光電子がビームの通るチャンバーにやってくることを抑制することができる。その他、大電流に強いベローズ（楕形ベローズ）やビームハローを除去するためのマスク（コリメータ）などの R&D も進んでいる。また、電子雲の問題に関しては、光電子の問題はアンテナチャンバーで対処できるが、二次電子の増殖に対しては、ドリフト部では KEKB でも用いられているソレノイド磁場が有効である。磁場中に関しては、TiN コーティングでも有効であるが、電子除去電極やグロブ表面が実用化できればより確実に電子雲を抑制できる。この場合、TiN コーティングは不要となる可能性があり、これらの R&D が進行中である。

次に、電子雲による不安定性を抑制するのにもう一つ考えられているのが、電子と陽電子のエネルギースイッチである。すなわち、電子雲が問題になるのは陽電子リングであるが、KEKB では LER が陽電子リングである。このため、ビームエネルギーも低く、ビーム電流も高いので、電子雲による不安定が起り易い。SuperKEKB では、陽電子リングを HER に電子リングを LER に変更する予定である。これを実現するためには、図 2 に示されている様に陽電子ターゲットの後の短い長さでビームを 8 GeV まで加速する必要がある。そのためには、加速管を現行の S-band から C-band に変更し、加速勾配を 2 倍にする予定であり、この C-band 加速管の R&D も進行中である。ビーム入射に関連してもう一つのアップグレード項目が、陽電子用のダンピングリングの設置である。現行の KEKB ではダンピングリングは必要なく、電子リニアックから直接 KEKB リングに入射が行われているが、SuperKEKB では、衝突点のベータ関数を更に絞り込むので、入射に必要なダイナミックアパーチャが足らなくなる可能性があり、リングに入射される陽電子のエミッタンスを小さくして、入射に必要なアクセプタンスを小さくすることが望ましい。

次に、バンチ結合不安定を押さえ込むためのビームフィードバックのアップグレードが重要である。現行の KEKB リングでもバンチ結合不安定が予想外に強力で、transverse 方向に関してはビームフィードバックなしでは非常に少ないビーム電流（<50 mA）しか蓄積できないが、SuperKEKB ではより大電流ビーム

に対して不安定性を抑制する必要がある。さらに、既に述べた様に、transverse 方向のみならず longitudinal 方向のフィードバックも必要で、R&D が行われている。また、バンチ間隔に関しても、2 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をよくすることが必要となる。これらの要請に応えるべく、次世代のフィードバックシステムの R&D が国際協力で行われている⁵⁾。これまで、iGp と呼ばれる高速 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等が行われ、実用性が確かめられている。

最後にもう一つ、大電流ビームを実現するために不可欠なのは、施設関係のアップグレードである。具体的には、まず大電流ビームが放出する放射光による真空チャンバーの発熱を防ぐために、冷却システムの大規模なアップグレードが必要である。また、使用電力も 80~90 MW と大幅に増えることから、電力施設のアップグレードも必要である。

6.3 より高いビームビームパラメータ (ξ_y)

現行の KEKB で達成されている値は、0.09 程度であるが、シミュレーション上は 0.15 に達することが予想されており、現在その実現に向けて努力中である。SuperKEKB ではさらに高い 0.3 以上の値を目標にしている。この高い値を達成するには、第一に、水平方向のベータatron 振動数をさらに半整数に近づけることが必要である。目標値は少数部が 0.505 である。現在の KEKB では LER はこの値でマシンを運転することができているが、HER は 0.510 ぐらいまでしか半整数に近づけていない。この LER と HER の違いは、LER には衝突点付近で発生した大きなクロマティシティを最初のアーク部までの間に補正するローカルコレクションの機構があるが、HER には存在しないことによる。SuperKEKB では HER にもローカルコレクションを設置する予定である。第二に、相手のビームがいない状態での global x-y coupling を現在の 1% 程度から、0.5% 程度まで下げる。このためには、ビームの状態を診断するビームモニター系の整備や電磁石のアラインメントの精度を上げること等を検討している。第三に、衝突点での水平方向のベータ関数 (β_x^*) を現在の 60~90 cm 程度から、20 cm まで絞り込む。これは衝突点付近の設計の問題であるが、現在までのところ 40cm までしか達成されていないので、さらに努力を要する。

7. アップグレードのシナリオ

最後に、どのようなシナリオでアップグレードを行う

表 4 SuperKEKB のコスト評価 (単位は億円)

	建設費 (3 年間)	Upgrade (運転時)	Total
真空	139.36	0	139.36
RF 系	16.45	84.25	100.7
施設	3	75.2	78.2
電磁石	31.9	0	31.9
Crab 空洞	5	10	15
ビームモニター系	17.7	4.5	22.2
入射器	10	53.7	63.7
Damping Ring	0	21.26	21.26
制御	2	7.4	9.4
衝突点付近	14.7	0	14.7
ビーム輸送	2.5	0	2.5
合計	242.61	256.31	498.92

ことを考えているかを、簡単に述べる。表 4 に以前に見積もった SuperKEKB のコスト評価を示す (最終案ではない)。基本的な考え方は、アップグレードを二段階で行うということである。まず、ビームを止めて 3 年間でアップグレードの建設を行い、ビーム電流の増強に必要なアップグレードおよび damping ring の設置以外を行う。但し、工事に時間のかかる真空系のアップグレードは、3 年の建設期間に行う。建設終了後、ビーム運転を行いながら、徐々に (例えば 5 年間かけて) 建設期間に行えなかった電流増強のためのアップグレードを行うというシナリオである。この様に二段階に分けるのは、建設コストが限られていると予想されるからである。もし十分な予算があれば、3 年間で全てのアップグレードを行うことは可能である。

参考文献

- 1) K. Abe, *et al.*, “Letter of Intent for KEK Super B Factory,” KEK Report 2004-4.
- 2) K. Ohmi *et al.*, Proc. of EPAC06, 616 (2006).
- 3) 船越義裕, 加速器, 4(4), p309 (2007).
- 4) P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, 2006.
- 5) 飛山真理, 高エネルギーニュース, vol. 27-4 (2009).