

## PRESENT STATUS AND FUTURE PLANS OF THE KEKB B-FACTORY

H. Koiso\*, T. Abe, K. Akai, M. Akemoto, K. Ebihara, K. Egawa, A. Enomoto, J. Flanagan, S. Fukuda, H. Fukuma, Y. Funakoshi, K. Furukawa, T. Furuya, J. Haba, S. Hiramatsu, K. Hosoyama, T. Ieiri, N. Iida, H. Ikeda, S. Inagaki, S. Isagawa, T. Kageyama, S. Kamada, T. Kamitani, K. Kanazawa, S. Kato, T. Katoh, M. Kikuchi, E. Kikutani, T. Kubo, M. Masuzawa, T. Matsumoto, S. Michizono, T. Mimashi, S. Mitsunobu, A. Morita, Y. Morita, H. Nakai, T. T. Nakamura, H. Nakanishi, H. Nakayama, Y. Ogawa, K. Ohmi, Y. Ohnishi, S. Ohsawa, N. Ohuchi, K. Oide, M. Ono, T. Ozaki, Y. Sakamoto, T. Shidara, M. Shimada, S. Stanic<sup>B)</sup>, M. Suetake, Y. Suetsugu, R. Sugahara, T. Sugimura, T. Suwada, Y. Takeuchi, Y. Takeuchi, M. Tawada, M. Tejima, M. Tobiyama, S. Uehara, S. Uno, S. S. Win<sup>†</sup>, N. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, K. Yokoyama, M. Yoshida, M. Yoshida, S. Yoshimoto, M. Yoshioka, F. Zimmermann<sup>C)</sup>,  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan  
B) University of Tsukuba, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan  
C) European Organization for Nuclear Research (CERN), CH-1211, Geneve 23, Switzerland

### Abstract

KEKB B-factory continues to improve the luminosity after having achieved the design value of 10/nb/s. Since Jan. 2004, KEKB is being operated in the Continuous Injection Mode (CIM) which significantly boosts the integrated luminosity. This article presents recent progress of KEKB and future plans one of which is introduction of crab crossing.

## KEKB B-ファクトリーの現状と将来

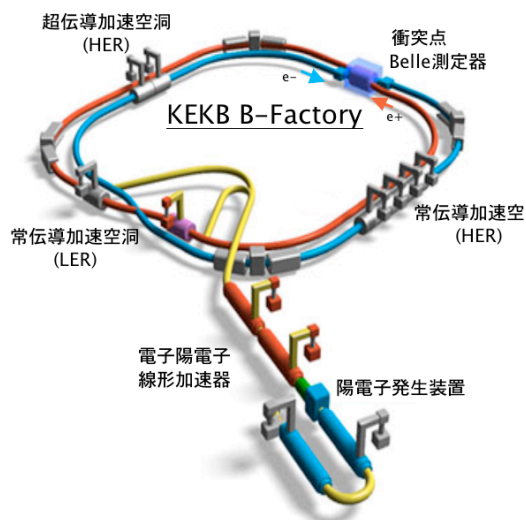


図 1: KEKB 概念図

## 1. OVERVIEW

KEKB B-ファクトリー<sup>[1,2]</sup>は、CP 対称性の破れを始めとする b-クォークに関する素粒子実験のため、ルミノシティ 10/nb/s を目標として設計・建設された電子陽電子コライダーである。入射器である電子陽電子線形加速器 (J-Linac) と周長 3 km のエネルギー非対称な 2 つのリング、3.5 GeV 陽電子リング (LER) と 8 GeV 電子リング (HER) から成り立っている。両リングは既存の TRISTAN トンネル内に約 1.1 m の

間隔で横ならびに配置され、唯一の衝突点に Belle 測定器が設置されている (図 1 参照)。

1998 年 12 月からリングのコミッションを開始した KEKB は、2003 年 5 月に設計値 10/nb/s を実現し、その後も順調にルミノシティを伸ばしている<sup>[3]</sup>。特に 2004 年 1 月以降、連続入射モードの実用化に成功し、ピークルミノシティの上昇率を上回る積分値の増加が目覚ましい。現在総積分ルミノシティは 288/fb に上り、2003 年 7 月までの蓄積量の 1.8 倍になっている。

本格的な物理実験開始以降の KEKB の履歴 (ピーク/1 日積分ルミノシティ、蓄積電流、全積分ルミノシティ) は図 2 に表示されている。Belle 測定器ロールイン (1999 年 6 月) 以後、4 年間で設計値達成に至ったことは非常に順調なペースと言える。2003 年 7 月以前の KEKB の性能については文献 3 に詳しい。大電流運転に起因するビーム不安定性、ハードウェアコンポーネントの様々な問題点が論じられている。ここでは、最近 1 年間の進展を中心に衝突パラメータ調整の観点から、KEKB の現状と今後のアップグレード計画を紹介する。

## 2. ビームパラメータ

### 2.1 電流、ビームビームパラメータ、 $\beta_y^*$

ルミノシティは

$$L \approx \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \frac{R_L}{R_y} \quad (1)$$

と表され、この式に従って高ルミノシティ・コライダーでは、出来る限り蓄積電流  $I_{\pm}$  を大きく、垂直

\* E-mail: haruyo.koiso@kek.jp

<sup>†</sup> visiting from NSRC, Thailand

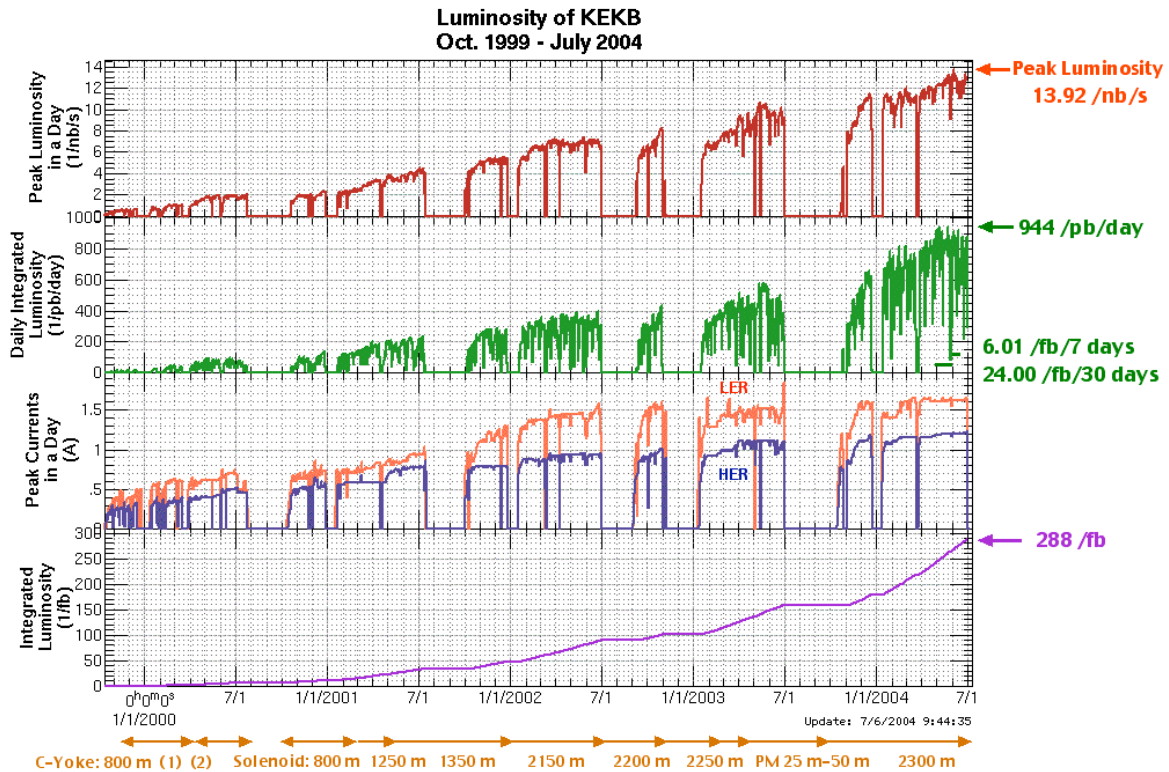


図2: KEKBの歴史。最下段の矢印は電子雲抑制のために設置された永久磁石とソレノイドの全長。

方向ビームビームパラメタ  $\xi_{y\pm}$  を大きく、衝突点垂直ベータ関数  $\beta_y^*$  を小さくする。 $R_L$ 、 $R_y$  は hour-glass 効果と有限の交差角度 (KEKB では 22 mrad) によるルミノシティとビームビームパラメタの補正係数であり、バンチ長  $\sigma_z$  が  $\beta_y^*$  より充分小さければ、比  $R_L/R_y$  は 1 に近い。

KEKB リングのビームパラメタは表 1 にまとめている。KEKB で選択された設計パラメタと現実の値を HER 側でみて比較すると、 $I_-$ 、 $\xi_{y-}$  は設計値よりやや大きく、 $\beta_{y-}^*$  は小さい。設計では  $\sigma_z = 4\text{mm}$  としており  $\sigma_z/\beta_y^* = 0.4$  であったが、現在のバンチ長は測定値  $\sim 7\text{mm}$  と  $\beta_y^* = 6.5\text{mm}$  より大きいので、 $R_L/R_y$  は 0.8 に減っている。これらを総合して、KEKB は現在設計値の 1.39 倍にあたるルミノシティを達成している。

## 2.2 バンチ間隔、バンチ数

LER の蓄積電流が設計値よりかなり少ないのは、1) これ以上電流を増加させてもルミノシティが上がらないこと、2) セプタムチェンバーの発熱というハードウェアの制約、の両方によるもので、現在  $\sim 1.65\text{A}$  で制限されている。1) の観点からはバンチ電流を増やさず、バンチ数を増加させればよいことになるが、バンチ間隔を平均 3.77 バケツから 3.5 バケツに狭めると、スペシフィック・ルミノシティが明らかに ( $\sim 10\%$ ) 劣化する。

平均 3.5 バケツ間隔のバンチフィルパターンを 2/3/4 バケツ間隔の混成で作った場合、2 バケツ

間隔のところで LER ビームサイズの増大が観測されており、電子雲の影響あるいは電子雲とビームビームの相乗効果によるものと推察されている。このような状況で式 (1) のパラメタを LER 側でみると、HER とは異なり、 $I_-$  が設計値よりかなり小さく (0.61 倍)、 $\xi_{y-}$  はかなり大きい (1.44 倍) 値となっている。

バンチ間隔が大きいと、バンチ電流は設計値の 2.4 倍 (LER)、4.2 倍 (HER) であり、 $\sigma_z$  が設計値より長いことを考慮しても HOM による発熱パワーは既に設計値の 1.4 倍 (LER)、2.4 倍 (HER) に達している。ハードウェアの発熱・放電・破壊等の危険に充分注意と払った慎重な運転が必須である。

## 2.3 チューン

パラメタの選択でルミノシティに大きな影響をもたらしたものは、ベータトロンチューン、特に水平チューン  $\nu_x$  である。設計時  $\nu_x$  の小数部は  $\sim 0.52$  を想定していたが、ルミノシティ調整の過程で  $\nu_x$  を半整数共鳴線に近づけるれば近づけるほどルミノシティが上がる、すなわち、 $\xi_y$  が上がるようになった (現在の  $\nu_x$  端数部は HER で 0.511、LER で 0.506)。これは、 $\nu_x$  が半整数共鳴線に近づくとビームビーム効果により  $\beta_x^*$  は減少、 $\varepsilon_x$  は増加し、水平ビームサイズはほぼ一定に保たれるが、実質的な  $\xi_x$  が弱まり衝突が安定化するためと考えられる<sup>[4]</sup>。この傾向は、最近のビームビームシミュレーションの予想とも一致している。図 4 に示すように LER  $\nu_x$  の変更 (0.511 から 0.506) によってルミノシティは 25% 向上している。

表 1: KEKB のビームパラメタ。右から、設計値、2003 年 7 月までのルミノシティ最高値、現在までのルミノシティ最高値、に対応するビームパラメタを示す。ここ 1 年間で、ピークルミノシティは 32%、各種積分ルミノシティは 53-87% 向上した。

	2004 June		2003 May		Design		
	LER	HER	LER	HER	LER	HER	
Energy	3.5	8.0					GeV
Circumference	3016						m
Current	1.58	1.19	1.38	1.05	2.6	1.1	A
Bunches	1289						
Curr./bunch	1.23	0.93	1.09	0.83	0.52	0.22	mA
Spacing	1.8 or 2.4						m
Emittance $\epsilon_x$	18	24	18	24	18	18	nm
$\beta_x^*$	59	56	59	58	33	33	cm
$\beta_y^*$	0.52	0.65	0.62	0.7	1.0	1.0	cm
Hor. Size @IP	103	116	103	118	77	77	$\mu\text{m}$
Ver. Size @IP	2.1	2.1	2.2	2.2	1.9	1.9	$\mu\text{m}$
$\xi_x$	.107	.075	.093	.068	.039	.039	
$\xi_y$	.070	.057	.067	.053	.052	.052	
Lifetime	152	178	133	259			min.
Luminosity	13.92						/nb/s
$\int \text{Lum}/24 \text{ hrs}$	944						/pb
$\int \text{Lum}/7 \text{ days}$	6007						/pb
$\int \text{Lum}/30 \text{ days}$	23998						/pb

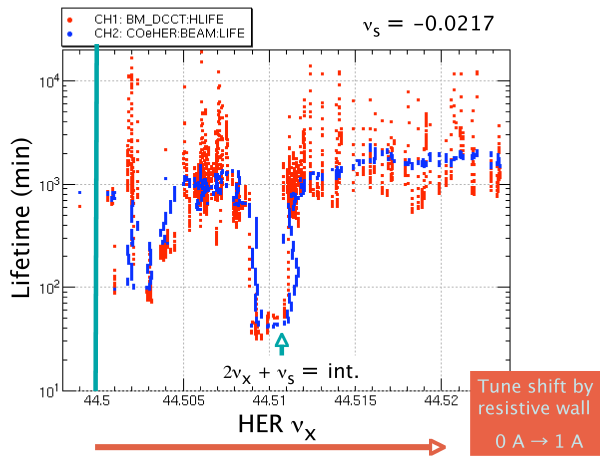


図 3: HER シンクロベータトロン共鳴線の影響。シンクロベータトロン共鳴線に対応する  $\nu_x$  のところで寿命が急落している。

シミュレーションによれば、HER の  $\nu_x$  を LER 同様 0.506 まで下げるにより約 20% のルミノシティ向上が期待できる。しかし、HER ではシンクロベータトロン共鳴線  $2\nu_x + \nu_s = \text{integer}$  の影響が強く、現状のままでは  $\nu_x$  を下げるのが難しい (図 3 参照)。1) 6 極磁場の最適化をおこないクロマティシティ補正を改善して共鳴線の影響を弱める、2) 運動量圧縮率  $\alpha_p$  を調整し (次節参照)、 $\nu_s$  を上げて共鳴線の位置をずらす、などの対策を検討している。

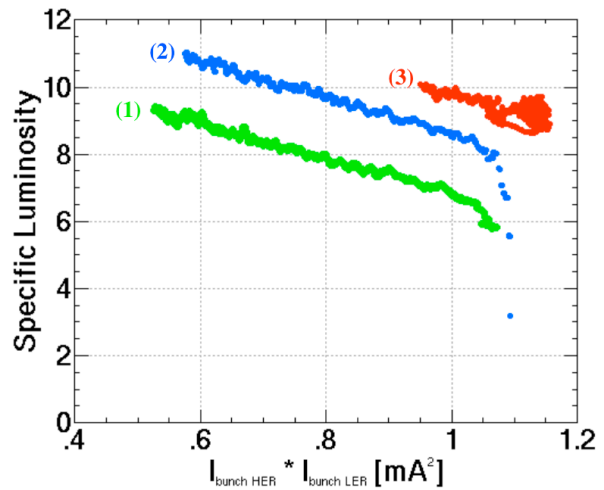


図 4: スペシフィック・ルミノシティ。(1)2002 年 10 月、(2)2003 年 12 月、(3)2004 年 6 月、CIM 運転

#### 2.4 $\beta_x^*$ , $\epsilon_x$ , $\alpha_p$

式 (1) にあらわに現れないが水平方向のパラメタ  $\beta_x^*$ ,  $\epsilon_x$  は  $\xi_y$  をとおしてルミノシティに影響を与えている。 $\beta_x^*$  を下げる、あるいは  $\epsilon_x$  下げるにより、ルミノシティが上がる事がシミュレーションで予想されている。

$2.5\pi$  セルを基本とする KEKB のラティスは  $\epsilon_x$ ,  $\alpha_p$  を広範囲に独立に調整することができるという大きな利点がある。 $(10 \leq \epsilon_x \leq 36 \text{ nm}, -4 \times 10^{-4} \leq$

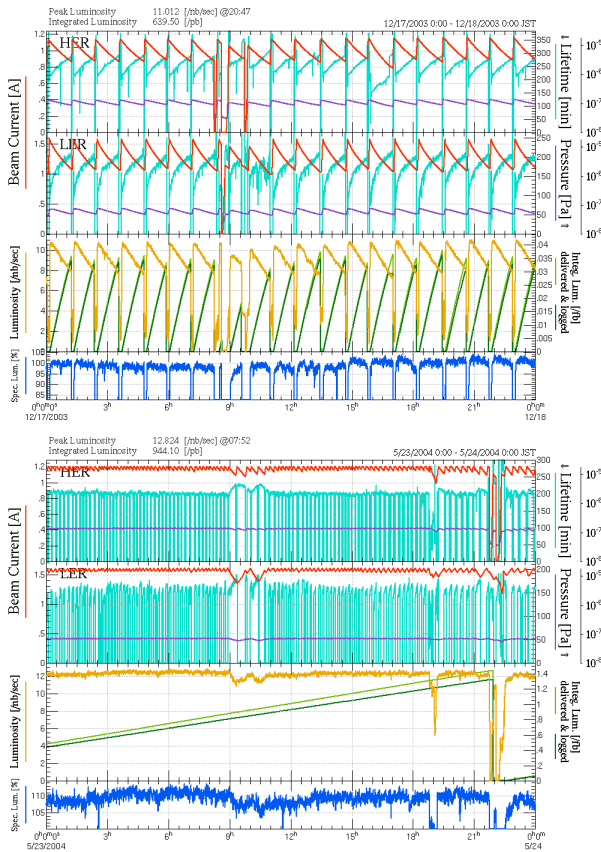


図 5: CIM の効果。それぞれ、上図は CIM 以前 (656/pb/day)、下図が CIM 運転 (944/pb/day) で積分ルミノシティ最高の 1 日。

$\alpha_p \leq 4 \times 10^{-4}$ ) 今後さらに電流増加を目指す運転状況の変化に応じて柔軟な対応が可能である。

### 3. 連続入射モード

連続入射モード (Continuous Injection Mode、以下 CIM と略する) とは、入射器からリングにビームを入射しながら同時に Belle 測定器のデータ収集を行う運転モードである。2001 年秋から検討を開始し、数回にわたるテスト的な CIM 運転をおこなった後、2003 年末に両リングとも CIM 実用化が可能になった。PEP-II も CIM 運転を行っており、LER のみの CIM を 2003 年 12 月初めから、両リングの CIM は 2004 年 2 月から開始している。

図 5 に示すように、CIM の効用は明らかで、従来の運転モード (入射中はデータ収集を止める) と比較して積分値が飛躍的に増加する。従来の運転モードでは 1 日あたり 3 時間 (9 分  $\times$  20 回) の入射によるロスがあり、またビーム寿命にしたがった電流減少によって物理データ収集時の平均ルミノシティは最高値の 82% にどまっていた。一方 CIM では、入射に同期して 3.5 msec の veto をかけるが、通常の 10 Hz 入射に対応するロス は 3% 程度で、しかも約 10 分周期の電子/陽電子切り替えで両リングの電流をほぼ一定に保つことにより最高値に近いルミノシティが

常時維持できる (図 4(3) 参照)。

また、CIM はルミノシティ調整にも有利であり、一定電流での運転によりチェンバーの温度などハードウェアの環境が定常化され、安定したビーム条件のもとでルミノシティ調整ノブの最適化がおこなえる。

### 4. クラブ空洞

KEKB は 22mrad の有限交差角度を採用し、1) 衝突点領域 (IR) の最終収束系の磁石配置が単純化・最適化され、2) Belle 測定器のバックグラウンドが軽減される、などの恩恵を享受している。有限交差角度に起因するルミノシティ劣化に備え、図 6 に示すように IR ラティスは現状のまま、正面衝突と同等の衝突状態を回復するクラブ交差方式<sup>[5]</sup>を可能にするため、KEKB の当初から超伝導クラブ空洞の開発が進められてきた。有限交差角度はこれまでのところ問題を引き起こしていないが、最近のビームビームシミュレーションで交差角ゼロの正面衝突の方が高いビームビームパラメタ ( $\xi_y \sim 0.1$ ) を得られる可能性が指摘されたため<sup>[6,7]</sup>、クラブ空洞の実用化が急務となってきた。 $\xi_y$  の期待値が実現すれば、ルミノシティは倍増に近くなる。2006 年初等のリング設置に向けて、クラブ空洞開発は、クライオスタット、入出力結合器、チューナーなどの設計が最終段階に入っている。

現在の計画は当初のものとは異なり、超伝導加速空洞が設置されている日光直線部に両リング 1 台ずつクラブ空洞を設置する。必要なキックを 1 台のクラブ空洞で与えるために、HER ではクラブ空洞のところで  $\beta_x \geq 200$  m としなければならず、4 極磁石の結線替えが必要となる。この方式では、クラブ空洞での横方向キックによるバンチの前後で異なる水平軌道がリング全周に発生するが、これまでのところビーム力学上の問題点は指摘されていない。実際のビーム運転を想定した調整/フィードバック方法の確立、など詳細な検討が進められている。

またクラブ空洞の他に、今後数年間の小規模アップグレードとして、1) ソレノイド磁場強化あるいは永久磁石増設など電子雲対策、2) LER 2.6 A、HER 2 A までの電流増加、3) アボートキッカー高速化、などが計画されている。

### 5. スーパー B-ファクトリー

さらに高いルミノシティ ( $\sim 250$  nb/s、現在の約 20 倍) を目指して、スーパー B-ファクトリー (SuperKEKB) の検討が進み、これまでの成果が Letter of Intent にまとめられている<sup>[8]</sup>。主なパラメタは  $\beta_y^* = 3$  mm、 $\xi_y = 0.14$ 、LER/HER 電流値 4.1 A / 9.4 A、などである (図 7 参照)。リングに関しては、トンネル、施設、電磁石、電源、などは出来る限り再利用し、大電流蓄積に備えて必要な改造・増強を行う方針で広範な検討がなされ、(新型真空チェンバーおよびベローズ、冷却システム、常伝導 ARES 空洞、RF 源、超伝導空洞の HOM ダンパー、などの増強) アンテナチェンバー試作、ARES 空洞 RF カプラーの開発などが実行に移されている。

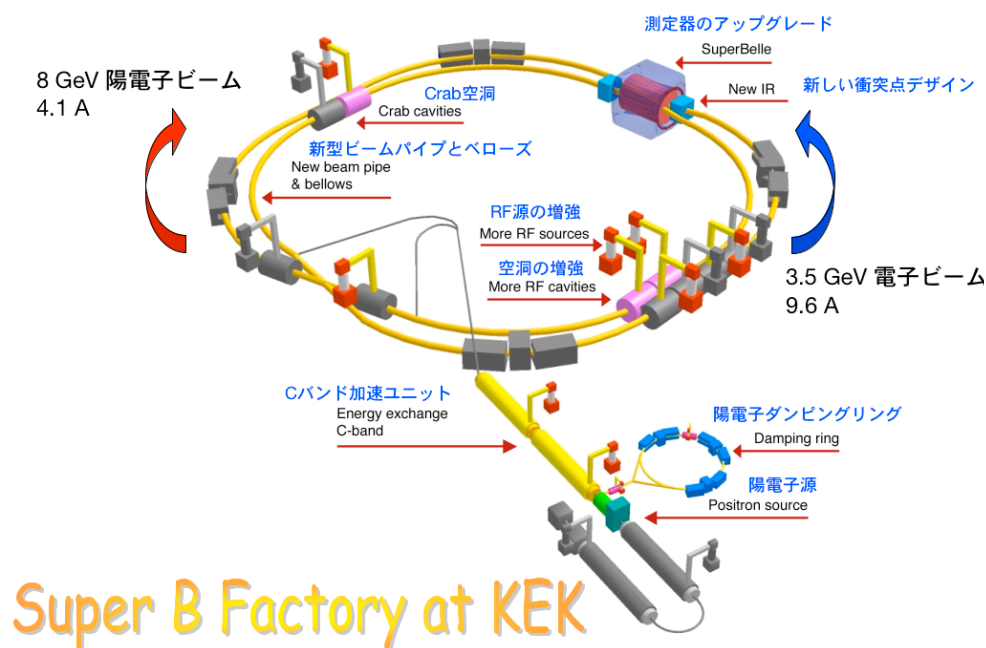


図 7: SuperKEKB 概念図。

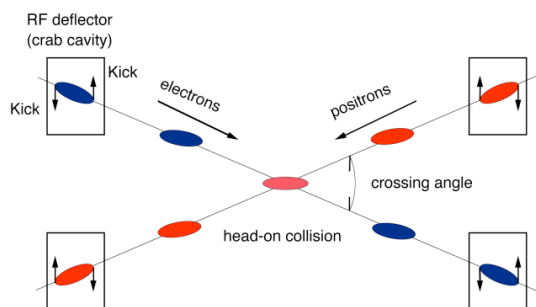


図 6: クラブ交差方式の概念図。KEKB では当初、図のように 1 リング 2 ずつクラブ空洞を I 設置し、クラブ軌道を IR に局在させる方針だった。IR にクラブ空洞設置用のスペースが確保されている。

- [5] K. Oide and K. Yokoya, Phys. Rev. A40, 315(1989).
- [6] K. Ohmi et. al., Phys. Rev. Lett. 92, 21401(2004).
- [7] K. Ohmi et. al., KEK-Preprint 2004-17, Submitted for publication.
- [8] Letter of Intent for KEK Super B Factory, KEK Report 2004-4.

## 6. 謝辞

KEKB の設計・建設・運転をご支援いただいた方々に心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] KEKB B-Factory Design Report., KEK Report 95-7,1995  
最新情報は URL: <http://kekb.jp>
- [2] Nucl, Instrum, Meth. A499, 2003.
- [3] K. Oide, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, November, 2003,  
URL: <http://conference.kek.jp/sast03it/oral.html>.
- [4] K. Oide, Proceedings of EPAC2002, Paris, France, 2002,  
pp.1-5.