

Design of SuperKEKB based on the Nano-Beam Scheme

H. Koiso*, for the KEKB and SuperKEKB Accelerator Group,
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

SuperKEKB is a major upgrade plan of KEKB aiming at the luminosity of $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 40 times higher than the luminosity record achieved at KEKB. Design strategy of SuperKEKB is based on the Nano-Beam scheme. The vertical beam sizes of both rings are squeezed to 50 - 60 nm at the interaction point, which increases the luminosity by a factor of 20, while beam currents are doubled. In this paper, optimization of main machine parameters and lattice design will be presented.

ナノビーム方式に基づく SuperKEKB の設計

1 ナノビーム方式

SuperKEKB は、KEKB のアップグレードにより、ピーク・ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、積分ルミノシティ 50ab^{-1} を目指すスーパー B ファクトリーである [1, 2]。現在の KEKB トンネル内に、現在のハードウェア機器を最大限活用して建設される。SuperKEKB の設計方針は、従来「大電流・クラブ交差方式」であったが、KEKB におけるクラブ交差の経験やコヒーレント・シンクロトロン放射 (CSR) の影響に関するシミュレーション等を踏まえて、2009 年に「ナノビーム方式」に変更された [1]。

ナノビーム方式は P. Raimondi と SuperB グループによって提案された方式であり [3]、衝突点における垂直方向ベータ関数 (β_y^*) をバンチ長より遥かに小さい値まで絞り込むことを可能にする。図 1 に示すように、水平ビームサイズが十分に小さいバンチ同士を、水平面内で大きな交差角をもって衝突させるので、バンチが重なり合う領域の進行方向の長さ (d) は、バンチ長自身より圧倒的に短くなる。したがって、砂時計効果に妨げられずに、 $\beta_y^* \sim d$ まで垂直方向ベータ関数を絞ることができる。

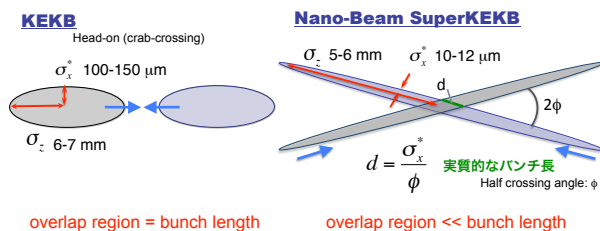


図 1: 通常の正面衝突 (左) とナノビーム方式 (右) の比較 (Y. Funakoshi, Y. Ohnishi et al.)

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

d は、衝突点における水平ビームサイズ (σ_x^*) と交差角 (2ϕ) で決まり、 $d = \sigma_x^* / \phi$ である。 d を小さくするには、 σ_x^* を小さく、すなわち、水平エミッタンス (ϵ_x) と衝突点水平方向ベータ関数 (β_x^*) の両方を小さくする必要がある。SuperKEKB では、 $\sigma_x^* = 10 \sim 12 \mu\text{m}$ 、 $\phi = 4.15 \text{ mrad}$ 、よって、 $\beta_y^* \geq d \simeq 300 \mu\text{m}$ となる。

2 マシン・パラメタ

衝突型加速器のルミノシティは、主要な三つのパラメタ、ビーム電流 (I_{\pm})、衝突点垂直方向 β 関数 (β_y^*)、および垂直方向ビーム・チューンシフト・パラメタ ($\xi_{y\pm}$)、によって、

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

と表現される。SuperKEKB は、 β_y^* を $\sim 300 \mu\text{m}$ まで絞ることによって 20 倍に、さらにビーム電流増加によって 2 倍に、合わせて KEKB の 40 倍のルミノシティを目指す。 $\xi_{y\pm}$ については、KEKB で既に達成されている 0.09 を想定している。

主要なマシン・パラメタを表 1 にまとめておく。KEKB の場合と同様に、これらのパラメタは複雑に絡み合っており、 $\beta_y^* \sim 300 \mu\text{m}$ とするためには、 ϵ_x を現在の $1/5 \sim 1/6$ に、水平垂直カップリングを $\sim 1/3$ に、 β_x^* を $\sim 1/10$ に下げなければならない (KEKB の設計値は $\beta_x^* / \beta_y^* = 330/10 \text{ mm}$)。目標とする衝突点垂直ビームサイズは $50 \sim 60 \text{ nm}$ となる。これが「ナノビーム方式」という名称の由来である。

大きな変更点の一つが、ビーム・エネルギーである。LER において、intra-beam scattering によるエミッタンス増大を軽減し、同時に Touschek 寿命を長

表 1: 主要なマシン・パラメタ ($1/\text{nb/s}=10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

	KEKB		SuperKEKB		
	LER	HER	LER	HER	
Energy	3.5	8.0	4.0	7.0	GeV
ϕ	0(crab)		41.5		mrad
Current	1.64	1.19	3.7	2.6	A
Bunches	1584		2500		
Spacing	mostly 1.8		1.2		m
ϵ_x	18	24	3.2	5.2	nm
ϵ_y/ϵ_x	0.83	0.62	0.27	0.25	%
β_x^*	1200	1200	32	25	mm
β_y^*	5.9	5.9	0.27	0.30	mm
σ_x^*	147	170	10.1	11.4	μm
σ_y^*	940	940	48	62	nm
σ_z	~ 7		6	5	mm
ξ_x	.127	.102	.0028	.0012	
ξ_y	.129	.090	.0889	.0807	
Luminosity	21.08		800		/nb/s

くするために、また、HERにおいて、より低いエミッタンスを得るために、ビーム・エネルギーを 3.5/8.0 から 4.0/7.0 GeV に変更する。エネルギーを上げても、LERにおける intra-beam scattering の影響は大きく、 $\epsilon_x = 3.2$ nm を得るには、ラティス設計値を ~ 2 nm にしておく必要がある。

3 ビーム光学系

Interaction Region

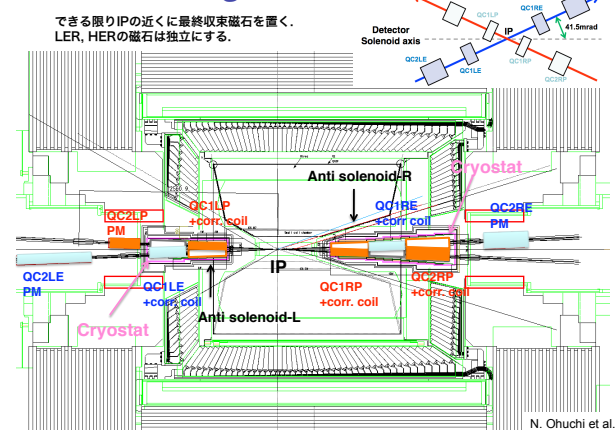


図 2: 衝突点設計 (N. Ohuchi, M. Tawada et al.) : 最終収束磁石群の配置と Belle II 測定器 [4]

3.1 超低 β ラティス

$\beta_y^* \sim 300\mu\text{m}$ を実現するには、衝突点領域の設計が要であり、衝突点を含む 200 m の直線区間全体を

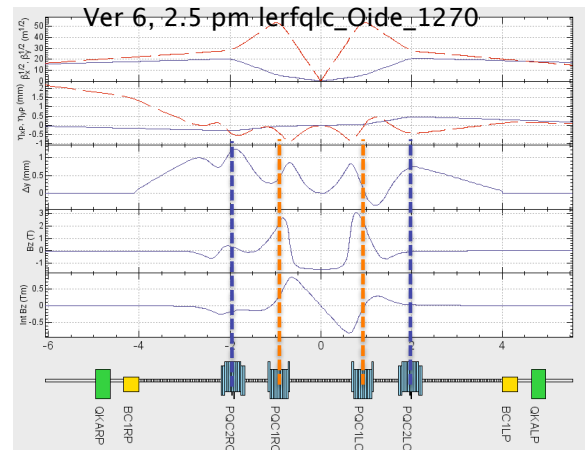


図 3: ソレノイド磁場分布と LER 衝突点近傍のオプティクス (N. Ohuchi, K. Oide et al.) : 上から (1) $\sqrt{\beta_{x,y}}$ 、(2) ディスパージョン、(3) 垂直軌道、(4) B_z 、(5) B_z 積分値。

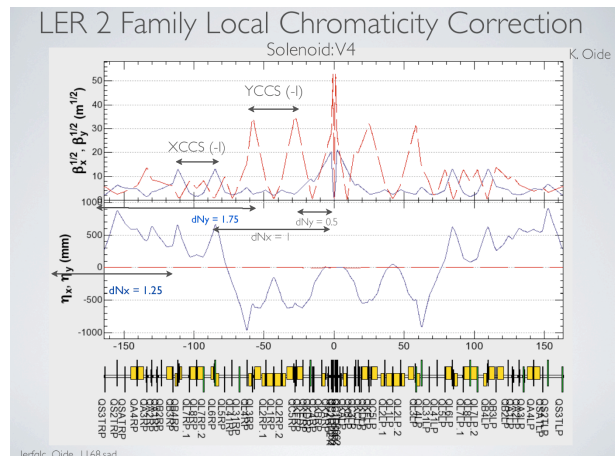


図 4: LER 衝突点領域 (K. Oide et al.)

再構築する。最終収束磁石群としては、超伝導/永久 4 極磁石の doublet を、LER と HER のそれぞれに独立に配置する (図 2)。4 極磁石をできるかぎり衝突点に近づけるために、補償ソレノイド磁場は 4 極磁石に重ね合わせるようになるが、ソレノイドによる垂直エミッタンス発生量を小さく抑えるように、磁場分布を調整する。具体的には、ソレノイド磁場 B_z の傾きと、衝突点からそれぞれの 4 極磁石中心までの B_z 積分値、の両者をできる限り小さくする (図 3)。(前者については、 $\epsilon_y \propto (xB'_z)^4$ となるので、衝突点から離れたところの B'_z の寄与が大きい)

ビーム寿命と入射効率にとって十分な力学口径を確保するためには、両リングに水平垂直両方向の局所色収差補正セクションを設けることが必須であり (図 4)、歪 6 極および 8 極磁場の導入と最適化も必要になる。

また同時に、入射率向上・バックグラウンド軽減のため、RF電子銃および陽電子ダンピングリングの設置による入射ビームの低エミッタンス化が欠かせない[5, 6]。

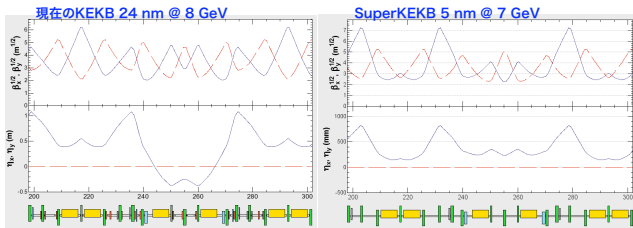


図 5: HERセル (Y. Ohnishi et al.)

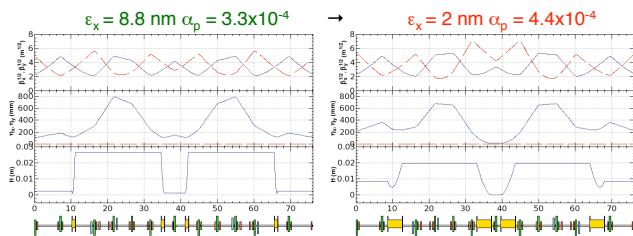


図 6: LERセル (A. Morita et al.)

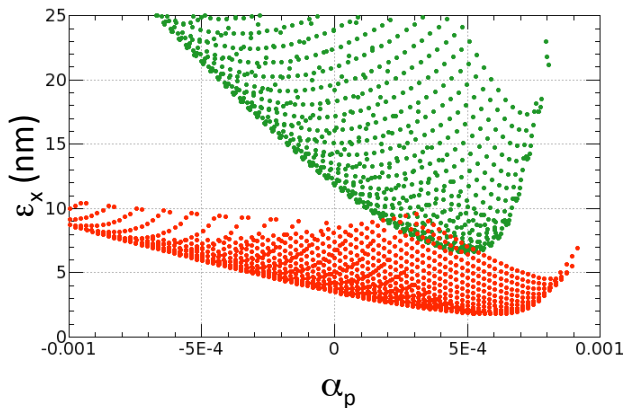


図 7: LER 2.5π セルにおける水平エミッタンスと運動量圧縮係数の可変範囲 (A. Morita et al.) : 偏向磁石の有効長 0.89 m (緑) と 4.0 m (赤) の比較。

3.2 低エミッタンス・ラティス

KEKBの曲線部を構成する 2.5π セル構造の調整能力を最大限活用して、最小限の変更で水平エミッタンス要求値を実現する。

HERはビームエネルギーを下げたことにより、現状の磁石配置のまま4極磁石の調整のみによって、 $\epsilon_x \sim 5$ nmを達成できる(図5)。LERでは、偏向磁石を長いもの(0.89 mを4 mに)に交換し(図6, 7)、ウィグラーの周期長も半分にする(図8)。

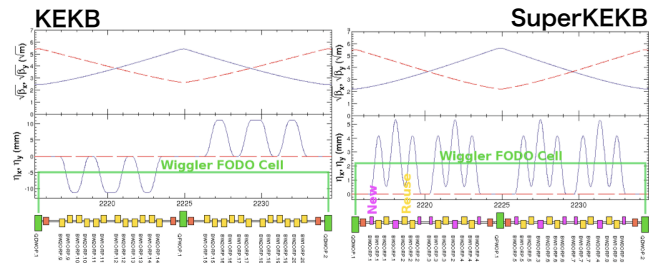


図 8: LER wigglerセル : 現在の磁石と新作の single pole および half pole 磁石を組み合わせる。

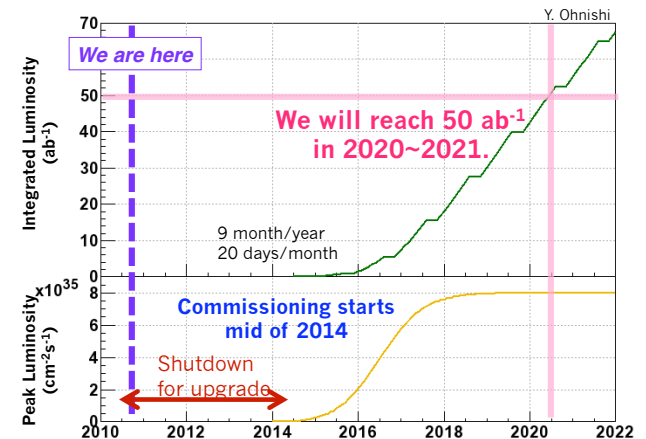


図 9: SuperKEKB のルミノシティ増強シナリオ (Y. Ohnishi et al.)

4 ルミノシティ増強目標

SuperKEKBは部分的(LER改造、陽電子ダンピングリング設置)に予算が認められ、アップグレードの第一歩を踏み出したところである。ビーム光学系の改造と合わせて、ビームパイプ交換、高周波システム増強、ビーム診断・制御システムの高度化など、両リングと入射器の全般にわたって改造を行い、最も早い場合、2014年後半のビーム運転再開と以後の図9のようなルミノシティ増強を目指している。

参考文献

- [1] K. Oide et al., Proc. of PAC'09, M03RAI01 (2009).
- [2] M. Masuzawa, Proc. of IPAC'10, FRXBMH01 (2010).
- [3] Belle II Technical Design Report, to be published.
- [4] P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy (2006).
- [5] M. Tawada et al., Proc. of IPAC'10, MOPEB034 (2010).
- [6] T. Kamitani, in these proceedings, WELH03
- [7] M. Kikuchi et al., Proc. of IPAC'10, TUPEB045 (2010).