

# DESIGN IMPROVEMENT AND CONSTRUCTION STATUS OF SUPERKEKB

Kazunori Akai<sup>#</sup>, Haruyo Koiso

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

## Abstract

KEKB operation finished on June 30, 2010, and the upgrade of KEBK to SuperKEKB, which will search for "new physics" beyond the Standard Model, has commenced. The design luminosity of SuperKEKB is  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , which is 40 times higher than that of KEBK. The design strategy for SuperKEKB is based on the Nano-Beam Scheme, where the vertical beam sizes of the low-energy positron ring (LER) and the high-energy electron ring (HER) are squeezed to 50–60 nm at the interaction point (IP). The beam currents in both rings will be double those in KEBK. Finalizing the design of optics and hardware at the interaction region is going on. Dismantling KEBK rings and fabrication of accelerator components for SuperKEKB including magnets, power supplies, and antechamber-type beam pipes have already started. This paper describes design improvement and construction status of SuperKEKB.

## SuperKEKB 設計の進展と建設状況

### 1. はじめに

KEKB は 2010 年 6 月 30 日にビーム運転を終了し、SuperKEKB の建設を開始した。SuperKEKB は標準理論を超えた物理の探索を目的とし、総積分ルミノシティ  $50 \text{ab}^{-1}$  の B・反 B 中間子対の生成を目指している。設計ルミノシティは  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であり、この値は衝突型加速器のルミノシティフロンティア、KEKB が到達した最高値の約 40 倍である。この性能を実現するために、ナノビーム方式<sup>[1]</sup>を採用し、衝突点での垂直  $\beta$  関数を KEBK の 20 分の 1 に、垂直方向ビームサイズを 50~60 nm に絞りこむとともに、両リングのビーム電流を KEBK 実績値の 2 倍に増加させる。

現在、ナノビーム方式の要である衝突点設計の完成度を高めるとともに、並行して KEBK リングの解体、新規装置の製作・試験等の建設作業を進めている。本論文では、昨年の本学会における報告<sup>[2]</sup>以降の設計の進展、および建設計画と進行状況について報告する。入射器については別に報告される<sup>[3]</sup>。

### 2. マシンパラメータ

SuperKEKB の主要な設計マシンパラメータを、KEKB の最高ルミノシティ運転時の値とともに表 1 に示す。ナノビーム方式実現のため、衝突点垂直  $\beta$  関数を約  $300 \mu\text{m}$  に絞り込むほか、水平方向エミッタンス、衝突点水平  $\beta$  関数、垂直/水平エミッタンス比をいずれも KEBK より小さくする。一方、垂直ビーム・ビーム・パラメータは KEBK とほぼ同じである。

ビームエネルギーは KEBK の 3.5/8.0 GeV (LER/HER) から 4.0/7.0 GeV に変更した。このエネルギー変更により、LER は intrabeam scattering によるエミッタンス増大が軽減され、短い Touschek 寿命

も改善される。また、HER は水平エミッタンスが減少し、放射光パワーが低減するなど、両リングにとってメリットがある。

ナノビーム方式により、バンチ長は極端に短くする必要がなく、KEKB と同程度でよい。これは、ロスファクターのバンチ長依存性やコヒーレント放射光 (CSR) の影響の観点から、望ましい。

一方、ビーム電流の倍増およびウィグラー増強等により、ビームパワーが両リング合計で約 16 MW と、KEKB の 2 倍以上に増大する。また、同じロスファクターで比較すると、高次モードパワーが約 3 倍に増加する。

表 1 : 主要なマシンパラメータ : KEBK は最高ルミノシティ運転時の値、SuperKEKB は設計値。

	KEKB LER/HER	SuperKEKB LER/HER
Energy (GeV)	3.5/8.0	4.0/7.0
Crossing angle (mrad)	0 <sup>(†1)</sup>	83
Circumference (m)	3016.26	3016.31
$\beta_y^*$ (mm)	5.9/5.9	0.27/0.30
$\beta_x^*$ (mm)	1200/1200	32/25
$\epsilon_x$ (nm)	18/24	3.2/4.6
$\epsilon_y/\epsilon_x$ (%)	0.83/0.62	0.27/0.25
Vertical beam size ( $\mu\text{m}$ )	0.94/0.94	0.048/0.062
$\xi_y$	0.129/0.090	0.088/0.081
Bunch length (mm)	6-7	6/5
Beam current (A)	1.64/1.19	3.6/2.6
Number of bunches	1584	2500
RF voltage (MV)	8.0/13.0	9.4/15.0
Energy loss /turn (MV)	1.5/3.5	1.87/2.43
Beam power <sup>(†2)</sup> (MW)	3.0/4.2	8.3/7.4
Luminosity ( $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	2.11	80

(†1) クラブ衝突により、交差角 22 mrad をキャンセル。  
(†2) parasitic loss 推定値を含む、全ビームパワー。

<sup>#</sup> kazunori.akai@kek.jp

### 3. 改造の概要

図1に改造の概要を示す。主なポイントは以下のとおり。

- LER の水平エミッタンスを下げるために、アーク部偏向電磁石を長いものに ( 0.89 m を 4.2 m に) 交換する。また、既存ウィグラー電磁石 (複極) の配置を変更し、半極および単極ウィグラー電磁石を新規に設置して、ウィグラー周期長を半分にする。
- HER の水平エミッタンスは、既存のアーク部電磁石配置のままで四極磁石を調整することにより、5 nm 程度まで下げることができる。さらに、後述するウィグラー部の新設により、設計エミッタンスまで下げる。
- 最終収束系および局所色収差補正の設計を一新し、衝突点両側±150m の筑波直線部区間を全面的に再構築する。
- 低エミッタンスかつ大電流の陽電子ビームの電子雲問題への対策として、LER 全周のビームパイプをアンテナチャンバー型ビームパイプに交換し、TiN コーティング、電子雲除去電極、グループ構造などの技術も駆使して電子雲密度を効果的に低減させる。
- ビーム電流およびビームパワーの増加のため、RF システムの増強と改造、真空システムの改造、冷却系および電力設備の増強等を行う。
- ビーム診断および制御システムの高精度化および高速化を行う。
- LER への入射陽電子ビームのエミッタンスを下げるため、ダンピングリングを新設する。
- 低エミッタンスかつ強度の高いビームを供給するために、新型電子銃や陽電子源の改造など、入射器のアップグレードを行う。



図1 : SuperKEKB への改造の全体スキーム。

### 4. 設計の進展

主リング ( LER および HER ) 設計に関する、2010年夏以降の主な進展を下記にまとめる<sup>[4]</sup>。

### 4.1 衝突点

衝突点垂直  $\beta$  関数 0.27(LER)/0.30(HER) mm を実現するには、最終収束系設計が要であり、以下の方針で最終的な最適化を進めている<sup>[5]</sup>。

- 衝突点 4 極磁石 8 台は全て超伝導磁石とする (図2)。
- ビーム軌道および力学口径最適化のため、全ての 4 極磁石に水平・垂直 2 極、歪 4 極、8 極の調整用コイルを装備する (総数 32 台)。
- Belle II 測定器のソレノイド磁場を超伝導補償ソレノイドによって打ち消し、ソレノイド磁場分布を最適化する。(衝突点両側でそれぞれ積分値をゼロにする、衝突点から 4 極磁石中心までの積分値をできる限り小さくする、等)
- Belle II ソレノイド外にある 4 極磁石 ( 3 台) は鉄ヨークを使用する。
- 鉄ヨークを使用しない 4 極磁石は、対向ビームの軌道上に非線形な漏れ磁場をつくる。この非線形磁場は対向ビームの力学口径を大幅に減少させる。これを防ぐために、対向ビームの側に漏れ磁場を補正するコイル ( 6、8、10、12 極) が必要になる。
- 漏れ磁場補正は、基本設計がほぼ完了し、必要な力学口径 ( Touschek 寿命 600 秒以上に相当) を保持できる目処が立っている。この方式では、前述の調整用コイルに加えて 20 台の補正コイルが必要になる。
- 現在、Belle II ソレノイド内の 4 極磁石 5 台のうち 3 台にも鉄ヨークを使用する方式を追求し、最終収束系の単純化を図っている。(漏れ磁場補正コイルの台数を総数 20 から 8 台に減らすことができる)
- 鉄ヨークの影響を含めて 3 次元磁場計算を行い、衝突点近傍の光学系モデルの精度を上げる。

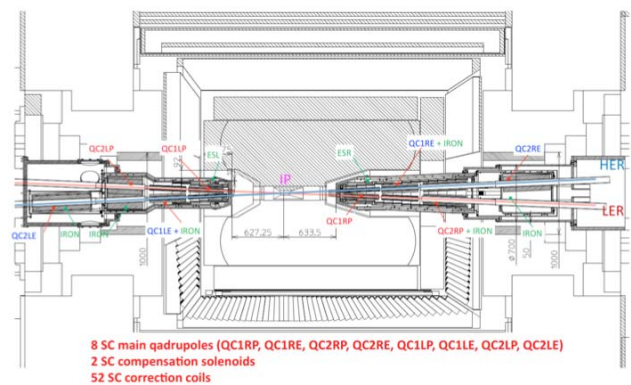


図2 : 衝突点最終収束磁石群 ( IP 右側: QC1RP, QC1RE, QC2RP, QC2RE、IP 左側: QC1LP, QC1LE, QC2LP, QC2LE ) と Belle II 測定器。(N. Ohuchi et al.)

#### 4.2 筑波直線部領域

以下の諸点を考慮してオプティクス設計の最適化を進めている。

- 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置する。
- 水平垂直結合パラメタの運動量依存性を補正し、光学口径を改善するために、各リングそれぞれ12自由度の歪6極磁場を導入する。このために、6極磁石の回転機構、および、歪6極コイル付き超伝導6極磁石を検討している。
- 筑波直線部領域の磁石配置を調整して LER と HER の周長を合わせる。リング周長は KEKB の時より約 53 mm 延びるが、入射器の RF 周波数をリング周長に合わせることが可能である。
- 既存のトンネルに適合し、かつ、両リングの磁石配置が干渉しないように、詳細な調整を行っている。

現時点の筑波直線部のビームラインを図3に示す。Belle II ソレノイド軸は KEKB から約 26 mrad 回転した位置にある。

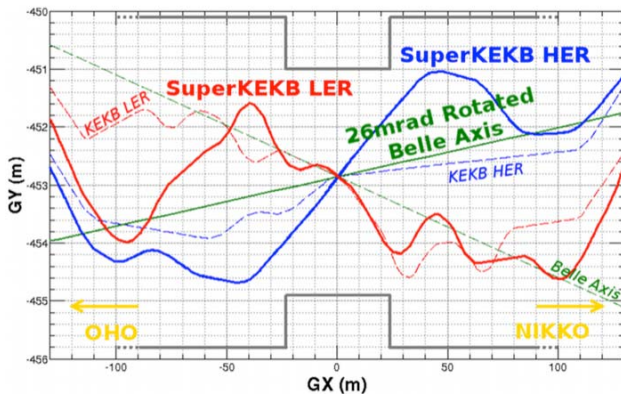


図3：筑波直線部領域のビームライン（青：HER、赤：LER、緑：Belle II ソレノイド軸。各色の波線はKEKBのライン）。局所色収差補正セクションを設置するために、ビーム軌道は複雑に曲がっている。上方がリング内側。（K. Oide et al.）

#### 4.3 HER へのウィグラー導入

前述のように、LER の既存ウィグラー磁石の3分の1を新しいものに置き換える。このとき不要となったウィグラー磁石を HER 大徳直線部に設置することにより、HER 水平エミッタンスを 5.2 nm から 4.6 nm に下げることが可能になる。この値を標準エミッタンスとする（表1）。さらに、図4に示すように、ウィグラーを増設すると 4.3 nm が達成できる見込みである。

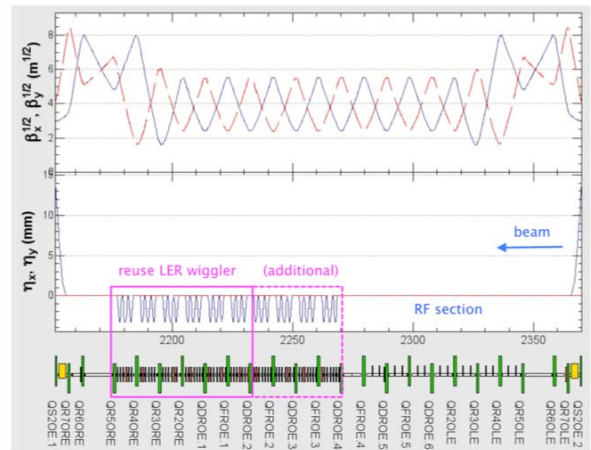


図4：HER wiggler セクション。6区間は LER から再利用する。残り4区間は将来の増設用。

#### 4.4 エラーの評価

各種マシンエラーの許容度の評価を進めている。例えば、衝突点領域 (IR) 以外の標準的な4極磁石の回転、曲線部および局所色収差補正部の6極磁石の垂直方向設置誤差の許容値が表2のように見積もられている。今後、より現実的な誤差評価と補正法の開発を進める。

表2：誤差許容値評価例。オプティクス補正無しで水平垂直結合が0.15%以下に収まることを条件とした。（H. Sugimoto, A. Morita et al.）

		LER	HER
4極 (IR 以外)	$\Delta\theta$	0.10 mrad	0.06 mrad
曲線部 6極	$\Delta y$	30 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
局所色収差補正 6極	$\Delta y$	20 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

### 5. 建設状況

#### 5.1 スケジュール

SuperKEKB 全体の建設スケジュールを図5に示す。現在、KEKB リングの解体を行うとともに、ビームパイプや電磁石等の製作を進めている。メインリングおよびダンピングリングともに、2014年度後半にビーム運転を開始する予定で建設を進めている。入射器は PF および PF-AR リングへの入射のための運転を行いながら、並行して改造を行い、2014年度初めから SuperKEKB のための低エミッタンスビームのコミッショニングを行う予定である。



## SuperKEKB construction schedule

Revised on Jun. 28, 2011

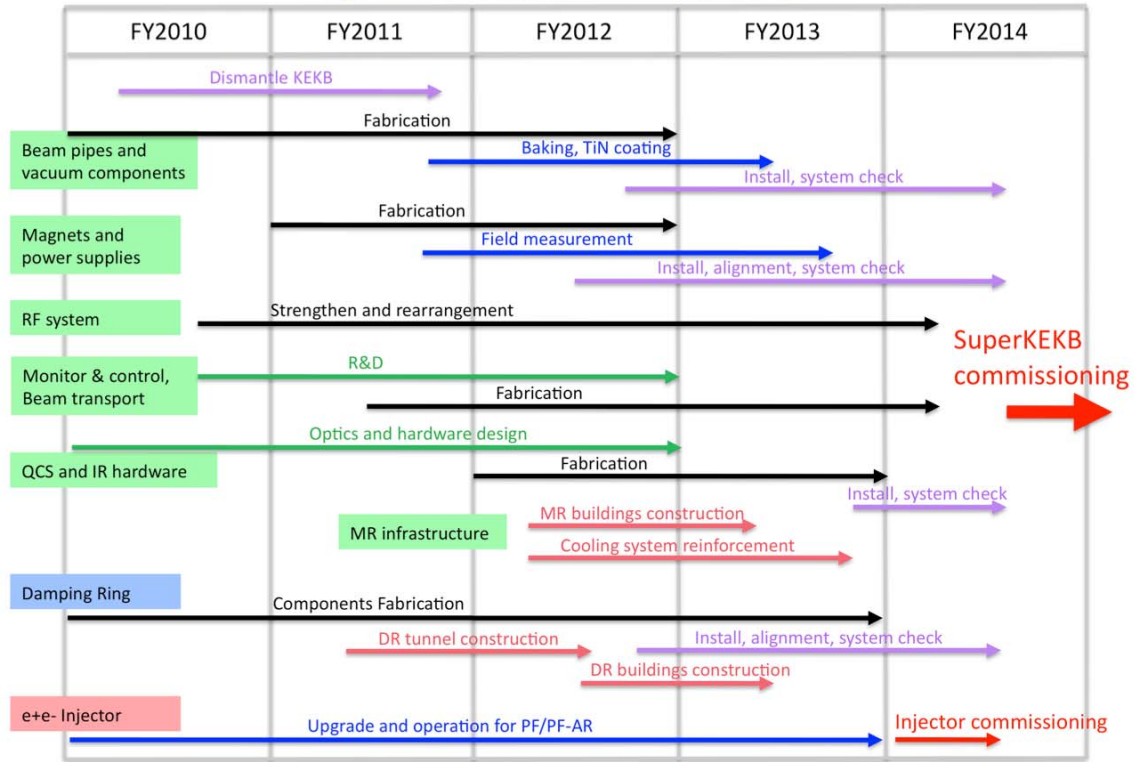


図 5 : SuperKEKB 建設スケジュール。

### 5.2 KEKB 解体

LER アーク部の偏向電磁石、補正電磁石およびビームパイプ等真空機器の解体・撤去作業を 2010 年度中に完了した。また、日光および大穂直線部のウィグラー電磁石の撤去も完了した。トンネル内の運搬にはエア台車を使用し、再利用予定の電磁石は地上の建物に移動、保管している。HER アーク部の電磁石は撤去せず、既存位置で再利用される。

筑波直線部については、すでに衝突点近傍の加速器機器を取り外して Belle 検出器がロールアウトされた。2011 年度には衝突点±150m 区間の両リングの解体・撤去作業を開始し、これまでに大部分の電磁石と真空機器の撤去を終えた(図6)。現在、地上電源棟の電磁石電源からトンネル内までのケーブル撤去作業、電磁石用ベースプレートの撤去および新設作業を進めている。

ARES 空洞については、大穂直線部 D5 側の HER 用空洞 6 台を LER 用に転用するための移設、予備空洞 2 台の D4 側への追加設置、富士直線部からの 4 台の撤去を予定しており、これらの作業を 2011 年秋～2012 年度にかけて行う。

リング直線部 4 実験棟の放射線遮蔽のために置かれていた門型シールドは、震災による中断をはさんで撤去を完了した。また、保管・作業エリアとして必要な 3000 m<sup>2</sup> におよぶスペース確保のため、既存建屋内の整理やテントハウス建設等を行っている。



図 6 : 電磁石撤去をほぼ終えた筑波直線部。

### 5.3 機器の開発・製作

すでにオプティクス設計の固まったアーク部およびウィグラー部については、電磁石、電磁石用電源、ビームパイプ等の主要な機器の製作を進めている。筑波直線部の電磁石やビームパイプ等については、2012 年度以降に製作する予定である。また、最終収束超伝導電磁石のコイル試作や回転六極電磁石等の

開発を行っている。

LER アーク部のアンテナチェンバーは、放射光パワー密度が比較的低いので、コスト低減および製作期間短縮のメリットを考慮し、材質としてアルミ製の採用を検討した。試作チェンバーのビーム試験等の結果、内面に TiN コーティングやグループ加工を施したアルミ製ダクトは、同様の加工を施した銅製ダクトと同等の電子雲低減効果のあることがわかった<sup>[6]</sup>。また、放射線科学センターの協力により、ダクト外側への放射線の影響も銅と大差ないと判断に至ったので、アルミ製の採用を決定した。なお、両リングのウィグラー部やシケイン部は放射光強度が高いので、銅製とする。

RF システムは前述の ARES 空洞移設のほか、クライストロン、電源およびハイパワー系を含めたステーション増設を行う。また、デジタルローレベル RF 制御系の開発を進めており、現在、試作器の評価試験を行っている<sup>[7,8]</sup>。

モニターおよび制御機器については、turn-by-turn 測定のための高速ゲート付き検出器、アンテナチェンバー用の 509MHz 狭帯域検出器、横方向に加えて新たに必要となる縦方向バンチ毎フィードバックシステム、X 線ビームプロファイルモニター<sup>[9]</sup>等の開発が進行中である。

新設するダンピングリング (図 7) 用の機器については、すでに電磁石および電源の製作を進めており、一部は納入され、磁場測定にとりかかった。ビームパイプには電子雲対策のためアンテナチェンバー型を採用し、現在、CSR 評価にもとづく断面形状の最適化と試作を進めている。加速空洞は ARES 空洞の加速空洞部をベースにしたシングルセル常伝導空洞を開発中である<sup>[11]</sup>。

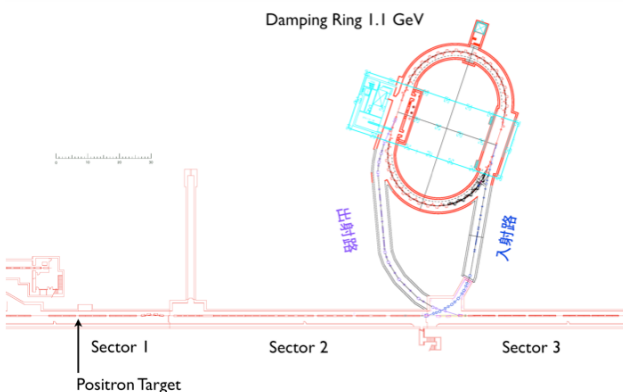


図 7 : 陽電子ダンピングリングおよび入射器からの入出射路<sup>[10]</sup>。

#### 5.4 施設関連工事

ダンピングリング用のトンネル (周長 135m のリングおよび入射器との接続部) および電源棟と機械棟を新規に建設する。すでに設計を終え、2011~12 年度にトンネルを、2012~13 年度に建屋を建設する予定となっている。

また、メインリングの電磁石の増加および冷却設

備増強のため、電源棟と機械棟を各 4 棟増設する。既設冷却配管の大幅な改造を含めた冷却設備および建屋の設計を 2011 年度に行い、2012~13 年度に建設する予定である。

#### 5.5 震災の被害

2011 年 3 月 11 日の震災で KEKB 加速器が受けた被害について、簡単に述べる。損傷を受けた主な機器は電源棟内に設置されているクライストロンおよびその冷却機器、高周波やモニター等の制御機器、トンネルから搬出して再利用のため地上に保管中のウィグラー電磁石や偏向電磁石等である。他の機器についても通電試験等による被害状況の正確な把握に努めているが、最終的な確認には今後、大電力試験を含めた、より詳細な調査が必要である。

KEKB トンネル内に 40 カ所以上ある接続部に最大 4 mm 程度のずれが生じた。リング内に多数設置されている基準点を再構築した上で、電磁石のアライメントをやり直す必要がある<sup>[12]</sup>。また、建物やトンネルの天井の損傷、壁や床の亀裂などが多くの箇所が発生した。

### 6. 今後の見通し

震災による、建設スケジュールへの影響について述べる。最大の問題はダンピングリングトンネルの工事着工に 2 ヶ月以上の遅れを余儀なくされ、しかも現時点でまだ開始時期が明らかでないことである。それに続く電源棟および機械棟の建設、機器のインストールおよび立上げ・調整への影響も必至である。また、前述のメインリングのアライメントに関わる作業量の増大も予想される。一方、損傷を受けた装置については復旧財源を必要とするものの、作業量としては建設期間内で完了可能と思われる。

2014 年度後半のビーム運転開始を目指して、現在、設計の最終化と建設作業を並行して進めている。衝突点領域の設計の完成など、残された設計課題に取り組むとともに、大量の機器の製作、設置、立上げ調整を厳しいスケジュールの中で進めていくことになる。また、リング、入射器、Belle II を含めたビームコミッションの具体的なシナリオについても、関係グループの議論を重ねて検討を進めている。

### 参考文献

- [1] P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy (2006).
- [2] H. Koiso, Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, 2010.
- [3] T. Higo, MOLH02, this conference.
- [4] Y. Ohnishi et al., TUPS020, this conference.
- [5] M. Iwasaki et al., TUPS017, this conference.
- [6] Y. Suetsugu et al., Proc. IPAC'10, p. 2021, (2010).
- [7] T. Kobayashi et al., MOPS112, this conference.
- [8] J. Odagiri et al., WEMH10, this conference.
- [9] J. Flanagan et al., WELH08, this conference.
- [10] M. Kikuchi et al., Proc. IPAC'10, p. 1641, (2010).
- [11] T. Abe et al., TUPS131, this conference.
- [12] M. Masuzawa et al., TUMH01, this conference.