

DESIGN AND CONSTRUCTION STATUS OF THE SUPERKEKB RINGS

Kazunori Akai, Haruyo Koiso*, for the SuperKEKB Accelerator Group,
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The upgrade of KEKB to SuperKEKB is going on. The construction started in FY2010, and the beam commissioning in the main rings is scheduled in FY2014. Fabrication of accelerator components including magnets, power supplies, antechamber-type beam pipes is steadily in progress. The design of the interaction region is being intensively studied to be finalized. Installation of new dipole magnets and TiN coating and baking of beam pipes have started. This paper describes recent design progress and construction status of the SuperKEKB main rings and the positron damping ring.

SuperKEKB リングの設計と建設の現状

1. はじめに

2014年度内の主リングにおけるビーム運転開始を目指して、SuperKEKBの建設が順調に進んでいる。SuperKEKBの設計はナノビーム方式^[1, 2]に基づいており、大きなPiwinski angle ($\phi_{\text{Piw}} \equiv \theta_x \sigma_z / \sigma_x^* \geq 20$)を導入して、衝突点垂直ベータ関数を $\beta_y^* \sim 300 \mu\text{m}$ (KEKBの約1/20)に絞り込む。目標ミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成するために、垂直方向ビームサイズを50~60nmに絞り込むとともに、両リングのビーム電流をKEKB実績値の2倍に増加させる。

SuperKEKB主リングの主要なマシンパラメータを表1に示す。このような超低ベータ・低エミッタンス・大電流のコライダーを実現するためには、KEKBリングおよび入射器の全般にわたる改造が必要である^[3, 4]。ここでは、主リングおよび陽電子ダンピングリングの設計と建設の現状について報告する。

2. 設計の進展

$\beta_y^* \sim 300 \mu\text{m}$ を実現するために、超伝導4極磁石(各リング4台ずつ)と補償ソレノイドからなる衝突点領域(IR)を新たに建設し^[5](図1)、IRを含む筑波直線部およびアーク部の一部(全長~300m)を全面的に更新する。

β_y^* が非常に小さいビーム光学系では、IR磁石群の非線形磁場によって力学口径が大きく左右される。したがって、力学口径とTouschek寿命を評価するには、3次元磁場計算を取り入れたIRの精密な光学系モデリングが必須である^[6]。現在は、(1)超伝導4極磁石に付随する非線形磁場、(2)鉄ヨークを持たないLER超伝導4極磁石(QC1RPとQC1LP)がHERビーム軌道につくる非線形な漏れ磁場(主要部分はHERに設置する6、8、10、12極キャンセル・コイルによって補正される)、(3)ソレノイドのフリンジ磁場、等を44極および歪44極成分まで取り入れて、ビーム光学系の設計・評価を行っている。

非線形磁場とソレノイド磁場分布の改善例を図2に示す。これまでに得られた力学口径からTouschek寿命はLER約480秒、HER約580秒と推定されているが、

表1: SuperKEKB主リングのマシンパラメータ。水平エミッタンスの括弧内の数値はintra-beam scatteringの効果を含まない値である。全寿命はTouschek、beam-gas、radiative Bhabhaによる寿命を総合したもの。

	LER (e+)	HER (e-)	units
Beam energy	4	7.00729	GeV
Circumference	3016.315		m
Half crossing angle θ_x	41.5		mrads
Piwinski angle	24.6	19.3	rad
Horizontal emittance	3.2 (1.9)	4.6 (4.4)	nm
Vertical emittance	8.64	11.5	pm
Coupling	0.27	0.28	%
Beta function at IP (x/y)	32 / 0.27	25 / 0.30	mm
Horizontal beam size	10.1	10.7	μm
Vertical beam size at IP	48	62	nm
Betatron tune (x)	44.530	45.530	
Betatron tune (y)	44.570	43.570	
Momentum compaction	3.25	4.55	10^{-4}
Energy spread	8.14	6.49	10^{-4}
Natural chromaticity (x)	-107	-168	
Natural chromaticity (y)	-785	-1131	
Beam current	3.60	2.60	A
Number of bunches	2500		
Particles / bunch	9.04	6.53	10^{10}
Energy loss/turn	1.87	2.45	MeV
Long. damping time	21.6	29.0	msec
RF frequency	508.9		MHz
RF voltage	9.4	15.0	MV
Synchrotron tune	-0.0247	-0.0280	
Bunch length	6.0	5.0	mm
Beam-beam param. (x)	0.0028	0.0012	
Beam-beam param. (y)	0.088	0.081	
Total beam lifetime	324	357	sec
Luminosity	8×10^{35}		$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Integrated luminosity	50		ab^{-1}

両リングとも色収差補正磁石の自由度が大きく(各リングに6極磁石:54自由度、歪6極磁石:12自由度、超伝導4極磁石の8極コレクター:4自由度)、さらなる最適化の余地がある。

ナノビーム方式の要であり、必要な物理・力学口径とビーム寿命の確保、ビーム・バックグラウンド低減^[7]などの課題が集中するIRについては、超伝導磁石のみならず、真空チェンバー、組み立て、サポート、コリメー

* haruyo.koiso@kek.jp

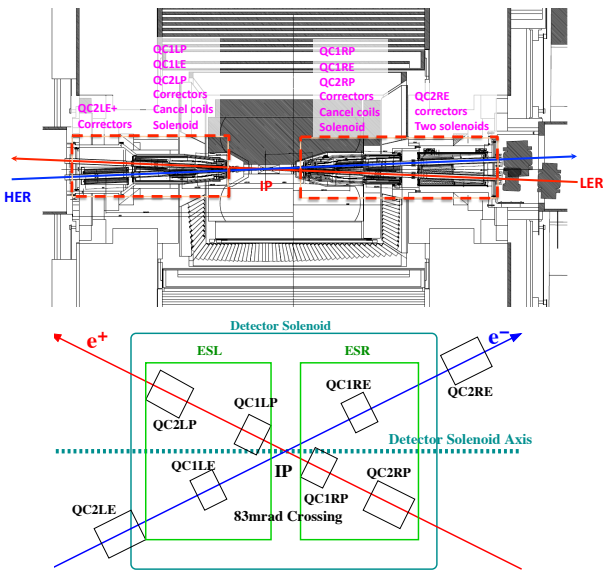


図 1: IR 磁石群と BelleII 測定器。

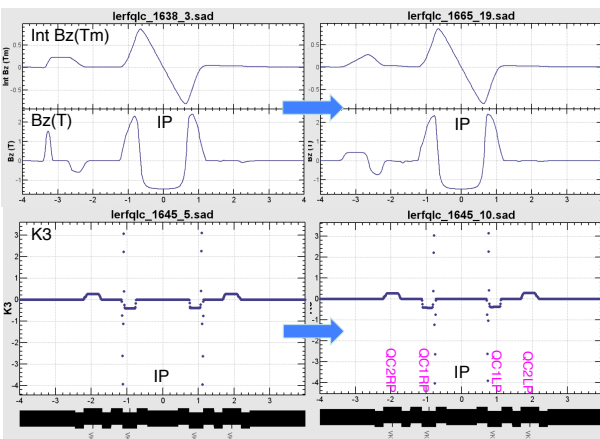


図 2: LER における IR の非線形磁場とソレノイド磁場分布の改善例。(上図) QC2RP のアーク側 (-3.5 ~ -3 m) にあるソレノイド磁場 Bz のピーク値を下げる。(下図) QC1RP と QC1LP について、無視できない 8 極成分が発生する lead end を衝突点側 (水平ベータ関数が小さい側) に置く。これらの変更によって力学口径と Touschek 寿命が改善された。

ジョン・システム、軌道安定化とフィードバック・システム、等の総合的な観点から設計の精密化が進んでいる。

各種マシンエラー許容度の評価、ビーム診断・制御・補正システムの仕様決定 (測定精度・スピード、single-pass BPM 等の台数・設置場所、etc.) は建設スケジュールに合わせて順次進められている。

ビーム光学系補正・ルミノシティ調整のための道具として、4 極磁石の補正コイル (1 電源に複数台の磁石が接続されている場合に個々の磁石を調整する)、6 極磁石補正コイルの歪 4 極励磁、歪 6 極磁石、6 極磁石回転機構、等が新たに整備される。ビーム光学系の診断・補正方法も開発中である [8]。

3. 建設状況

SuperKEKB 建設スケジュールの概要を図 3 に示す。主リングおよび陽電子ダンピングリングの主な状況を以下に報告する。

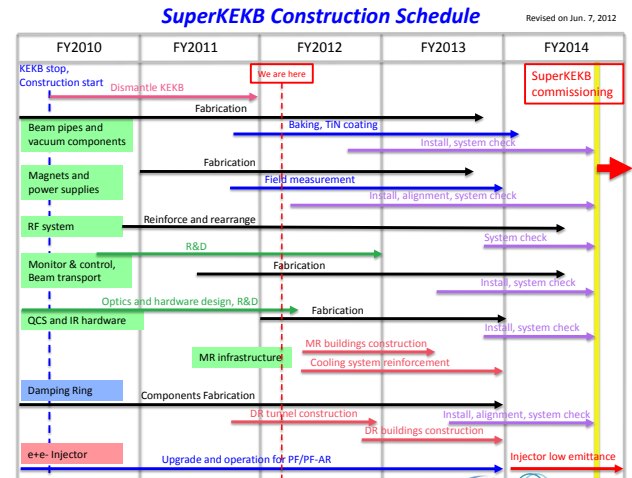


図 3: SuperKEKB 建設スケジュール (2012 年 6 月 7 日版)。



図 4: (左上) 大穂実験棟の真空作業デッキに設置された縦型コーティング装置 1 号機および新型ベーキング装置。(右上) LER 新偏向磁石のための磁場測定ベンチ。(左下) 超伝導 4 極磁石 (QC1P) R&D 機。(右下) HER から LER に移設された ARES 空洞。

- 2011 年度に製作した LER 用新型偏向電磁石 (水平エミッタンスを KEKB の ~1/5 に下げるため 0.89m から 4.2 m に磁石長を長くする) は全数の磁場測定 (図 4 右上) を終了し、6 月からリングへの設置を開始した。現在、半数 (LER が内側にある部分) の設置が終了し、外側アークへの設置 (内側にある HER を越える必要がある) に取りかかっている。
- 新型ウィグラー電磁石 (水平エミッタンスを下げるためウィグラーの周期を 1/2 にする) は組み立て作業を行っており、その後磁場測定を行う。

- トンネル内電磁石および基準点の全周にわたる精密測量が終了した。結果を解析し、8月から修正アライメントを開始する。
- LER アーク部および両リングウィグラー部のアンテナチャンバー型ビームパイプは製作が完了した。ビームパイプ内面の窒化チタンコーティング装置、および熱風を用いた新型ベーキング装置が大穂実験棟の真空グループ作業デッキで稼働開始した(図4左上)。縦型コーティング装置5台、横型コーティング装置3台、ベーキング装置4台を用いて約2年間で1100本のビームパイプを処理する^[9]。
- 衝突点超伝導電磁石およびクライオスタットのうち、設計の固まった衝突点左側の機器について製作を開始した。Belle II 測定器内部により深く組み込まれる右側についてはビーム・バックグラウンドを大幅に低減するよう求められ、クライオスタット内のシールド追加やQC1RP(鉄ヨーク無し)からの漏れ磁場補正等が検討されたが、シールド追加により解決の目処が立った。QC1P R&D機(LER)とQC1Eプロトタイプ(HER)をKEK内で製作し(図4左下)、冷却・励磁試験を行った。両磁石ともクエンチ無しで実用運転値(67.94 T/m、70.68 T/m)を越える磁場を達成できた^[5]。
- Belleを回転して設置するために、衝突点の架橋を一部改修する工事を9月までに行う。
- 電磁石および真空システムの冷却系を大幅に増強するため、新設機械棟4棟を建設し、トンネル内の既存冷却配管を大口径のものに置き換える。トンネル内配管改修については、できる限り既存電磁石等の移動を行わずに実施できるよう検討した結果、配管の「送り出し工法」を採用することで、影響を最小限に抑えられる見通しがついた。
- ビーム電流・ビームパワーの増加に備え、RFシステムを増強し、加速空洞の配置を最適化する^[10]。大穂直線部においては、D5側のHER用ARES空洞6台のLERへの移設(図4右下)、D4側のHER用ARES空洞2台の追加設置、および地上部RFシステムの増設作業が進行中である。
- 陽電子ダンピングリングのトンネル建設工事が2011年12月に着工された。震災の影響により当初の予定から半年遅れている。トンネル完成後に電源棟・機械棟の建設、設備整備、加速器機器設置・調整という順序で建設が進むので、ダンピングリングのコミッショニングは2014年度末頃となる見込みである。CSR評価にもとづいて最適化を行っていたビームパイプ断面形状を決定した^[11]。
- 今年度製作を予定している主要な機器は、ベローズおよびゲートバルブ、電磁石および電磁石用電源、ビーム位置モニター用電極、加速空洞用入力結合器、クライストロンおよびクライストロン用電源、ダンピングリング用ビームパイプおよび加速空洞等である。

- 東日本大震災による設備の被害状況の調査および復旧作業を、建設作業と並行して行っている。損傷したクライストロンおよび電源、冷却システム、制御機器等の修理・更新、保管中に損傷した電磁石の磁場測定による健全性の確認、トンネルの亀裂や水漏れ等の修復を進めている。また、HERビームパイプ用ベローズの全数(約800個)について、X線検査によって内部の健全性を調査した結果、内部のフィンガーが破損しているもの等が発見された^[12]。

4. 主リングのビームコミッショニング

SuperKEKB主リングのコミッショニングは2段階に分けて行う予定である。まず、2014年度後半にBelle II 測定器・IR磁石群を設置しない状態でビーム運転を開始する(Phase I)。この期間に、ダンピングリングを含む各加速器システムの立ち上げ、真空チャンバーの焼きだし、低エミッタンスビーム調整等を行う。

2015年度にIR磁石群を設置して低ベータ・低エミッタンス運転に移行する(Phase II)。測定器を含む具体的な立ち上げスケジュールをBelle IIグループと検討中である。

参考文献

- [1] P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy, 2006.
- [2] H. Koiso, WEPL02, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010.
- [3] K. Akai et al., MOPL02, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2011. K. Akai, H. Koiso, K. Oide, TUPPR006, IPAC12, 2012.
- [4] T. Higo et al, TUPPR005, IPAC12, 2012. T. Higo et al. WEUH03, these proceedings.
- [5] N. Ohuchi et al., WEPL05, these proceedings. N. Ohuchi et al., THPPD023, IPAC12, 2012.
- [6] A. Morita et al., THPZ007, IPAC11, 2011. Y. Ohnishi et al., THPZ008, IPAC11, 2011.
- [7] H. Nakayama et al., TUPPR007, IPAC12, 2012.
- [8] H. Sugimoto et al., WEPS032, these proceedings.
- [9] Y. Suetsugu et al., FRLR18, these proceedings.
- [10] K. Akai et al., WESH05, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010.
- [11] K. Shibata et al. WEPS129, these proceedings.
- [12] S. Terui et al., WEPS127, these proceedings.