

## SuperKEKB リング建設の現状

### CONSTRUCTION STATUS OF SUPERKEKB RINGS

赤井和憲, 小磯晴代<sup>#</sup>,

Kazunori Akai, Haruyo Koiso<sup>#</sup>, for the SuperKEKB Accelerator Group,  
KEK (High Energy Accelerator Research Organization)

#### Abstract

The construction of SuperKEKB is now going on, and beam commissioning of the main rings is scheduled in FY2014. Detailed design of the beam lines in the interaction region, which is fully reconstructed, has been finalized, and magnets for the new beam lines are being installed. The left-side part of the final focus superconducting magnet system is being produced. Baking, TiN coating, and installation of beam pipes, installation of new main dipole magnets and wiggler magnets in the LER, replacement of the ARES cavities and improvement of the RF stations, and strengthening of the cooling system for magnets and beam pipes are steadily in progress. This paper describes recent design progress and construction status of the SuperKEKB main rings and the positron damping ring.

#### 1. はじめに

SuperKEKB は KEKB を改造して建設中の電子・陽電子 2 リングコライダー (HER: 7GeV 電子, LER: 4GeV 陽電子) である。KEKB の 40 倍に当たる  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を目標ルミノシティとし、衝突点垂直ベータ関数を KEKB の  $\sim 1/20$  ( $\beta_y^* \sim 300 \mu\text{m}$ ) に絞り込む。衝突方式にナノビーム方式<sup>[1]</sup>を採用することによって、KEKB と同程度のバンチ長のままで、hourglass 効果に制限されずに  $\beta_y^*$  を大幅に減少することが可能になる。超低  $\beta^*$  を目指すとともに、蓄積ビーム電流も約 2 倍 (HER: 2.6A, LER: 3.6A) に増強する。また、入射器で生成される陽電子ビームを LER に入射する前に十分にエミッタンスを下げておくために、新たに周長 135m の陽電子ダンピングリング (DR) を建設する。

現在 2014 年度内の主リングビーム運転開始に向けて、入射器とリングの両方で建設・改造作業が進んでいる。本稿では主リングおよび DR の現状を報告する。

#### 2. 設計の進展

設計に関して以下のような進展がある。

- SuperKEKB のビーム光学系において、要求される光学口径とビーム寿命を確保するためには、衝突点超伝導 4 極電磁石<sup>[2,3]</sup>に付随する多極磁場成分を十分に小さく抑える必要がある。4 極磁場を形成する超伝導コイルの設置誤差によって 6 極および歪 6 極磁場が発生する可能性があるが、既に製作中の衝突点左側磁石系には 6 極・歪 6 極磁場を補正する補正コイルが組み込まれていない。最近のシミュレーションにおいて、QC1 磁石 (衝突点に最も近い垂直方向収束磁石) に 6 極・歪 6 極磁場が発生すると、光学口径の

劣化が激しいことが判明したため、今後製作する右側磁石系に 6 極・歪 6 極補正コイルを組み込む方針で補正コイル配置の最適化を行った。(図 6 参照)

- クライオスタット内に十分なタンゲステン・シールドを追加することにより、衝突点における radiative Bhabha 散乱による深刻なビーム・バックグラウンドを許容値レベルに抑える目処がたった。
- 衝突点超伝導電磁石の支持架台・架橋の設計に関して、床面の振動に起因する電磁石の振動によるルミノシティへの影響を評価している。30Hz 以下の振動に対しては、軌道フィードバックによって適正な衝突状態を保持する。30Hz 以上の速い振動によるルミノシティ低下は、架橋の補強を行わなくとも 2% 以下に抑えられる見込みであるが、より詳しいシミュレーションが進行中である。
- 垂直エミッタンスは、衝突時のビームビーム効果を含めて 8~11pm に抑える必要がある。各種のマシンエラーが垂直エミッタンスおよび力学口径に与える影響をシミュレーションによって総合的に評価し、その補正方法を開発している<sup>[4]</sup>。
- 主リングの電磁石アライメントについては、既設電磁石の局所的な凹凸のみを修正し、大きな修正量を要する大局的再アライメントを避ける方針をとる。シミュレーションによれば、今後予想されるトンネル地盤の不等沈下を考慮しても、光学系補正によって垂直エミッタンスを適正な値に保つことができると予想されている<sup>[5]</sup>。ただし、筑波直線区間の局所色収差補正 6 極電磁石については、特に精密なアライメントと軌道保持が必要である。

<sup>#</sup> haruyo.koiso@kek.jp

### 3. 建設の進捗状況

SuperKEKB に要求される低エミッタンス、低 $\beta^*$ 、および蓄積ビーム電流増倍を実現するため、KEKB の電磁石システム、真空システム、高周波システム、ビームモニターおよび制御システム等の大規模な改造、DR 用機器製作、主リングおよび DR の施設工事等を進めている。建設およびコミッショニングの全体スケジュールを図 1 に示す。

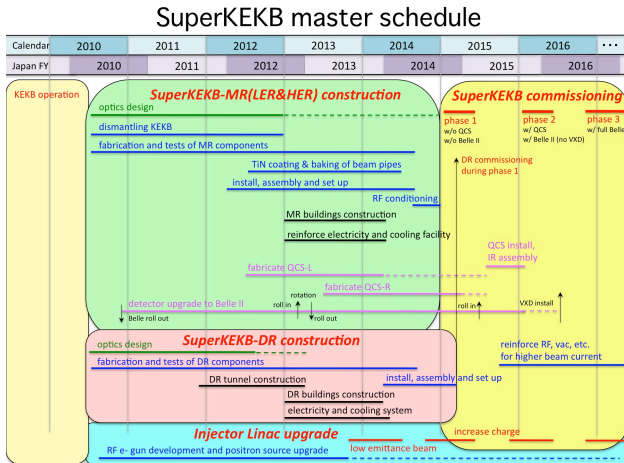


Figure 1: Schedule of SuperKEKB construction and commissioning.

電磁石システムについては、KEKB の電磁石を可能な限り再利用しつつ、SuperKEKB の新しいビーム光学設計にもとづき電磁石の追加、交換、配置変更等を行っている。これまでに、LER アーク部の偏向電磁石約 100 台を、KEKB の 0.9m 長のものから、新規製作した 4m 長のものに全数を交換した (図 2)。また、LER のウィグラー電磁石セクションのレイアウトを一新するとともに、HER にもウィグラーセクションを新設した (図 3)。さらに、衝突点の両側約 300m の区間は両リングとも全く新しいビームラインとなるため、全面的な撤去・更新を行っている。電磁石用の電源についても、電磁石台数の増加に対応し、また電磁石毎の独立な制御を行うために新規に多数、製作している。



Figure 2: New 4m bending magnets for the LER.

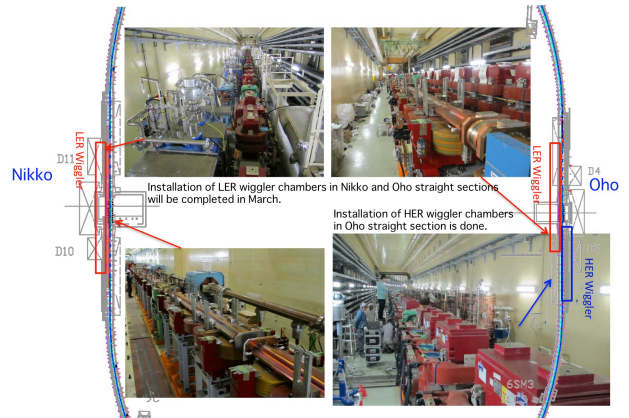


Figure 3: Wiggler magnets and antechamber-type beam pipes installed in the Nikko and Oho straight sections.

真空システムは、電子雲不安定への対策として、LER のビームパイプの大部分をアンテチェンバー型ビームパイプ (図 4) に交換する。HER においても、ウィグラー区間や衝突点近傍区間のビームパイプを発熱対策や真空度向上のためにアンテチェンバー型に交換する。ビームパイプ内面からの二次電子放出を抑制するための窒化チタンコーティングや脱ガスのためのベーキング等の表面処理を行うための設備を KEBK 大穂実験棟内に整備した (図 5)。この設備を用いて約 1000 本以上のビームパイプを 2 年間で処理する<sup>[6]</sup>。現在は 15 本/週程度のペースで量産が進んでおり、これまでに半数以上が終了した。処理を終えたビームパイプはトンネル内に順次、設置している<sup>[7]</sup>。



Figure 4: Antechamber-type beam pipes.

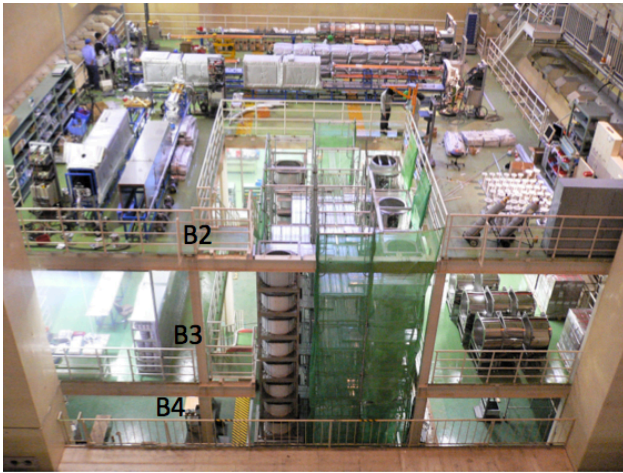


Figure 5: TiN coating and baking facilities constructed in the Oho experimental hall.

最終収束用の超伝導電磁石は、ビームを強く絞るための強力な磁場を高精度につくることが要求される。電磁石先頭部が Belle II 測定器 (Belle からアップグレードされて Belle II になる) に入り込む形で、非常に狭いスペースに 8 台の主四極コイルおよび光学補正用の 40 台以上の補正コイルが配置される (図 6、図に示した多極コイルの他に各 4 極磁石には水平 2 極・垂直 2 極・歪 4 極コイルが配置される)。KEK 内で製作した試作器を低温で励磁試験し、運転に必要な電流までクエンチ無しで到達するなど、良好な結果が得られた<sup>[3]</sup>。補正コイルは米国ブルックヘブン研究所の協力を得て設計・製作を進めている。実機の電磁石・クライオスタットシステムは衝突点左側のものを昨年度に製作開始した。右側は今年度から来年度にかけて製作する。

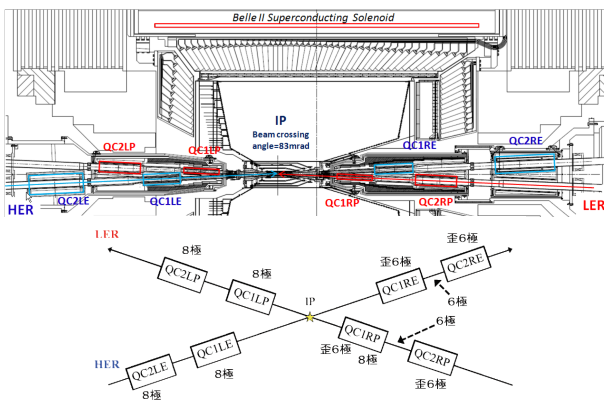


Figure 6: Schematic drawing of the final focus superconducting magnet system (N. Ohuchi, H. Sugimoto, et al.).

高周波加速システムは、KEKB で使用した超伝導空洞や ARES 型常伝導空洞等を再利用するが、ビーム電流を倍増するために、クライストロンおよび電源等の高周波源を増設するとともに、空洞の配置換えおよび入力結合器の交換、冷却系増強等を行って

いる。また、高精度の高周波制御を行うために、新たに開発した  $\mu$ TCA 規格の FPGA ボードを搭載した新型高周波制御システムへの更新や光伝送高周波基準信号分配システムの導入を進めている<sup>[8,9]</sup>。

ビーム精密計測システムの更新・改良も進めている。ビーム位置モニタはアンテナチャンバー化に対応した新たな検出器への交換およびターン毎測定システムの導入を行う。ビームサイズモニタは放射光の干渉を利用した従来の測定方法に加え、より小さなサイズを測定できる X 線イメージングを用いた測定器を開発している。バンチ毎フィードバックシステムは KEKB の実績をベースに、新しい制御ボードを採用して構築する。また、加速器制御・安全システムについても、より高速かつ信頼性の高いものとするため、計算機やネットワーク等の更新を進めている。

DR は震災のためトンネル建設の着工が半年遅れたが、すでにトンネル工事が完了し (図 7 は建設時の状況)、電源棟および機械棟の建屋建設および冷却系等の設備整備が進行中である。また、DR 用の電磁石および電源、ビームパイプ、加速空洞等の加速器機器の製作および試験も並行して進めており<sup>[10]</sup>、2014 年度にトンネルおよび電源棟内に設置する予定である。

以上のように、SuperKEKB 建設を順調に進めている。2013~14 年度も引き続き、機器の製作、試験、設置および立上げ等を行い、2015 年 1 月にビーム運転を開始する見込みである。



Figure 7: DR tunnel under construction.

#### 4. コミッシュニングシナリオ

加速器グループと Belle II グループ間の協議にもとづき、コミッシュニングを三段階で進めることを決定した。

- Phase 1 (2015 年 1 月~6 月を予定) では Belle II 測定器および超伝導電磁石をインストールしない状態で、低エミッタンスビーム調整や真空コンディショニング等の加速器調整を行う。DR はこの期間内に完成し、4 月頃から立ち上げを行う。
- 2015 年夏から超伝導電磁石および Belle II 測定器 (最内層のバーテックス検出器を除く) の設置作業を行い、Phase 2 運転 (2016 年初め~) に入る。ここでは、衝突点での絞り込みやビーム衝突等の加速器調整を行うとともに、Belle II

検出器へのバックグラウンドの測定を行い、  
Belle II 測定器を安全に運用可能な環境を整える。

- Belle II 最内層のバーテックス検出器を装着して Belle II を完成させ、Phase 3 運転（2016 年末～）に入る。本格的な物理実験を行いながら、設計ルミノシティに向けて加速器調整を継続する。十分な運転時間が確保された場合に、ピークおよび積分ルミノシティは図 8 のように増加する見込みである。

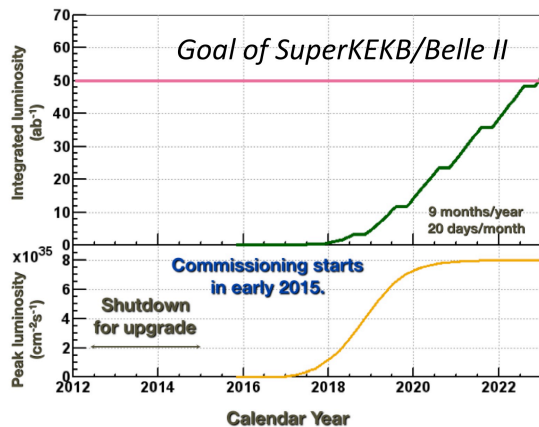


Figure 8: Luminosity projection of SuperKEKB.

## 参考文献

- [1] P. Raimondi, 2<sup>nd</sup> SuperB Workshop, Frascati, Italy, 2006.
- [2] H. Koiso, “ナノビーム方式に基づく SuperKEKB の設計”, WEPL02, Proceedings of the 7<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010.
- [3] N. Ohuchi, et al., “SuperKEK ビーム衝突点用超伝導電磁石システムの設計”, WEPL05, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012.
- [4] N. Ohuchi, et al., “SuperKEK ビーム衝突点用超伝導 4 極電磁石プロトタイプ製作と試験結果”, SUP056, these proceedings.
- [5] H. Sugimoto, et al., “SuperKEKB における Low Emittance Tuning のシミュレーション”, SAP034, these proceedings.
- [6] A. Morita, et al., “SuperKEKB 主リングにおける電磁石アライメント方針”, SUP007, these proceedings.
- [7] K. Shibata, et al., “SuperKEKB 用ビームダクトの窒化チタンコーティング及びベーキング”, SUP097, these proceedings.
- [8] Y. Suetsugu, et al., “SuperKEKB 真空システムの建設-II”, SUP102, these proceedings.
- [9] K. Nakanishi, et al., “SuperKEKB 用 LLRF 制御システムの開発”, SUP093, these proceedings.
- [10] T. Kobayashi, et al., “SuperKEKB 高周波基準信号分配システム”, SUP094, these proceedings.
- [11] T. Abe, et al., “SuperKEKB 陽電子ダンピングリング用高周波加速空洞の大電力試験”, SAP057, these proceedings.