

LINAC UPGRADE FOR SUPERKEKB

Toshiyasu Higo[#]

On behalf of KEK Injector group and all those who are developing SuperKEKB
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Upgrade of the KEKB to the SuperKEKB has started targeting the luminosity increase by 40 times by reducing emittance and increasing current. Accordingly, various upgrade requirements are needed to the injector linac. Two main issues are “low emittance” and “high charge” for both electron and positron beams. In order to realize them, such upgrades are critical as high-charge low-emittance electron source, high-charge positron production, positron damping ring for emittance reduction, and emittance preservation for both beams along the linac. These upgrades should be met consistently with the simultaneous injection not only to the SuperKEKB rings but also to the Photon Factory rings.

The linac upgrade scenario has been discussing to meet the commissioning of the SuperKEKB in 2014. Basic idea on new development items are such as the low-emittance and high-charge photo cathode RF gun for electron source, the high-charge positron production system with flux concentrator followed by L-band RF acceleration, and the emittance preservation through whole linac with better alignment and finer beam measurement systems. In order to realize these, such hardware developments as photo-RF gun, flux concentrator, L-band accelerator, large-aperture S-band accelerator, laser-based alignment, finer emittance measurement, higher resolution BPM, etc. are being developed in parallel. By taking the advancement of these developments into account, some of the design choices are to be made to complete the injector upgrade by the end of FY2013. It is to be noted that these upgrade developments are practically related to the recovery processes from the damage due to the March 11 earthquake. In the present paper, we describe the basic strategy of the upgrade and review the present status of the related developments.

SuperKEKB のための入射器アップグレード

1. はじめに

KEKB の 40 倍のルミノシティで運転する SuperKEKB へのアップグレードが始まった^[1]。このアップグレードに関係する入射器の重要なパラメータを表 1 に示した。リングの蓄積電流は 2~3 倍に大きくなるが、それ以上に高ルミノシティ運転の結果として蓄積電流寿命が短くなり、入射器はそれを補充するためにこれまでの数倍の大強度ビームを供給する必要がある。また、リング内の低エミッタンスビームによる衝突実験を維持しながらの入射する必要があり、入射ビームエミッタンスをこれまでに比べて数倍~200 倍低くすることが必須になった。本稿では、昨年の本学会報告^[2]に続き、最近の進展と今後の方針に焦点を当てて述べる。これを実現するための入射器アップグレードの基本方針は、

- (1) 光 RF 電子銃を開発して低エミッタンス・高チャージの電子ビーム源を実現する、
- (2) 断熱マッチング (AMD) 収束方式と L バンド加速器を含めた大口徑 RF 加速システムを導入して、DR へ入射する高チャージの陽電子源を実現する、
- (3) ダンピングリングを用いて陽電子エミッタンスを低減する、
- (4) 電子源や DR から供給される陽電子の低エミッタンス特性を悪化させずにその後のライ

ナックでの加速するために、アラインメントの高精度化やビーム計測の高度化に基づくビームベースアラインメント等を進める

- (5) PF リングへの同時入射を実現しながら SuperKEKB に必要なアップグレードを実現していくため、パルスステアリングやパルス Q マグネットを更に導入する、
等である。

表 1 : Parameters of injector linac for SuperKEKB

Parameter	KEKB		SuperKEKB	
	e ⁺	e ⁻	e ⁺	e ⁻
Energy [GeV]	3.5	8.0	4.0	7.0
Stored current [A]	1.6	1.2	3.6	2.6
Beam life [min]	150	200	10	10
Bunch charge [nC]	1	1	4	5
Number of bunches	2	2	2	2
Emittance [μm]	2100	100	10	20
Energy spread [%]	0.125	0.05	0.07	0.08
Bunch length [mm]	2.6	1.3	0.7	1.3

ここで SuperKEKB 入射器の基本構成を図 1 に示した。セクター A 上流端には、光 RF 電子銃を設置するが、陽電子生成用の大チャージ運転に必要な場

[#] Toshiyasu.higo@kek.jp

合を想定して、現在の DC ガンを残す。セクター1の中間部に陽電子発生用のターゲットをおき、陽電子はセクター2 下流端から取り出して DR に入射し、再度セクター3 の上流端に再入射する。HER 電子ビームへのエネルギー付与は、全セクター (ABC12345) を用いるが、陽電子は DR エネル

ギー1.1GeV に後続セクター (345) での加速が加わって行われる。セクター5 の下流には、パルスマグネットで PF リングへの電子入射、エネルギー補正 (ECS) を通して LER へ陽電子を輸送し、電子ビームはそのまま HER へ入射する。

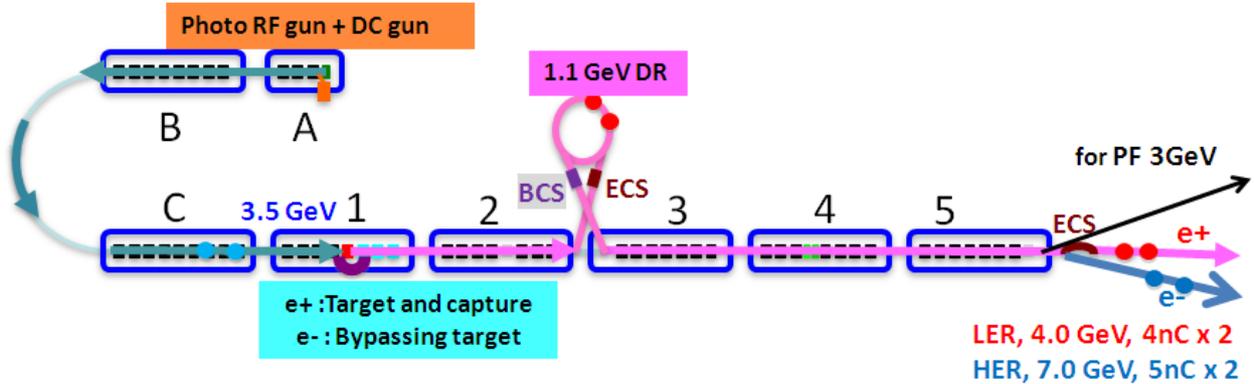


図1 : SuperKEKB での入射器構成

本稿ではこれらの各構成システムの設計方針と開発の現状を簡単に述べる。詳細は各システムの設計開発に関する本論文に掲げる参考文献を参照して頂きたい。

2. 電子ビーム

入射器の電子ビームには 3 つの役割がある。第一は、SuperKEKB HER への低エミッタンス、高チャージバンチの供給、第二に SuperKEKB LER への陽電子ビーム生成用、大チャージバンチの供給、第三に放射光リング (PF や AR) への電子供給である。

これまで KEKB で運転してきた電子ビームは～1nC×2 バンチであり、これの 5 倍のチャージをしかも低エミッタンスで供給する必要がある。SuperKEKB では光カソードの RF ガンを用いてこれを達成する。昨今 1nC 級のバンチチャージに対しては 1μm 級のエミッタンスを実現されているが、これを 5nC で実現すること、更に SuperKEKB のようなルミノシティマシンで実現するには、数ヶ月～1年のスケールでそのシステムが安定である必要があり、この観点からの開発が重要である。

入射器では現在、数十 MV/m 級の低電界に抑え、ギャップ間の収束電界を効率的に用いた DAW 型 RF 空洞のガンでそれを実現する方式^[3,4,5]と、多くの加速器で既に実用化されてきている BNL 型 1.6 セル空洞のガンで実現する方式^[6]とを検討している。ともにシミュレーション上では 10μm を切るビームエミッタンスがガン空洞出口からは得られており、実際の入射器ラインへエミッタンスやバンチ長等を損なうことなく入射できれば SuperKEKB への可能性の確認ができる。3 月 11 日の東日本大震災の影響もあり、この試験は多少遅れており、試験場所も変更せざるを得なくなったが、両システムとも入射器に連結して試験すべく準備進行中である。

前者では、LaB₆ カソードを光駆動で動かす試験運転を図2に示すように、セクター3 の 3-2 ユニットで 9 月から実施すべく準備中である。后者は、銅カソードを 200nm の光で駆動、又は Ce₂Te 光カソードでの可能性、を検証できるよう、図3に示すようにセクターA での試験を年末までに開始すべく準備を進めている。

これらの試験運転から、今年度内にはコミッションニング時の方式を決定する予定である。

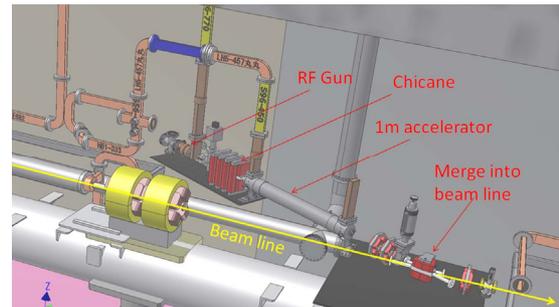


図2 : 3-2 ユニットでの DAW 型ガンセットアップ

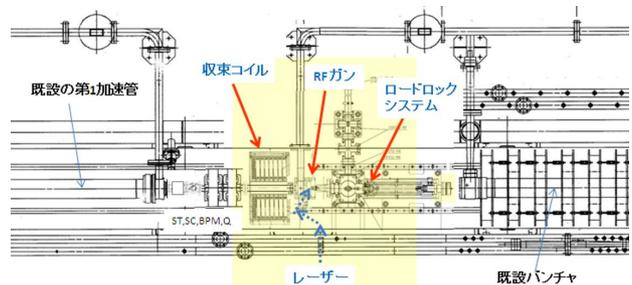


図3 : A1 での BNL 型ガン試験セットアップ

3. 陽電子ビーム

3.1 構成

KEKB での陽電子バンチチャージに比べて数倍の強度を要求され、しかも DR^[7] (ダンピングリング) への入射エネルギーを確保するためにターゲット位置はこれまでより上流に移動したため、衝突電子エネルギーは 4GeV から 3.5GeV に下げざるを得なくなった。このため、電子あたりの陽電子の収率は数倍に上げる必要が生じた。このため、大口径のキャプチャー部で横方向のアクセプタンスを稼ぎ、低周波 RF 加速を導入して縦方向のアクセプタンスを向上させた^[8,9]。

陽電子ラインの構成を図 4 に示した。10nC 級の電子バンチを W ターゲットに当てて陽電子を発生させ、大口径の L バンド加速管^[10] (2m×2 本) と現在の S バンド加速管より大口径の φ30 を確保した LAS (Large aperture S-band) 加速管 1 ユニット (2m×4 本) を加えてキャプチャーする。この直後でシケインを設け、発生電子陽電子の分離、HER 用電子ビームの合流、陽電子テールのコリメーション等を行う。これに続いて LAS を 2 ユニット追加したのち、既存の S バンド加速管 7 ユニットで DR 1.1GeV までのエネルギー付与を行う。

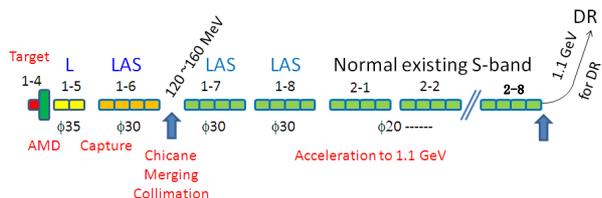


図 4 : 陽電子生成～DR へ

3.2 L バンド周波数選択

L バンド周波数はリング周波数との整数比関係、入射器内の 100ns 離れた 2 バンチの加速を実現するための S バンド周波数との関係を基に、 $2856\text{MeV} \times (5/11)$ とした。このため、S バンドサテライトの減少に貢献できて、DR への入射時のロスを減らすことができることがわかった。最低限図 2 の 2 台の L バンド加速管を導入するが、必要に応じて後続の LAS 1 ユニットの L バンド加速ユニットに入れ替えることができるように設計は進めている。

3.3 AMD 収束

ターゲット直後の収束系としては、KEKB でのパルスコイルに変えて FC^[11] (Flux Concentrator) を採用する。これにより明確な AMD (断熱マッチング) 収束磁場プロファイルが設定でき、しかもターゲット直後で数 T 級の高い磁場が期待できるので、陽電子の収量アップが実現できる。これまで BINP との共同研究で 10T を目指した FC 開発を行ってきたが、現在は 2 年後の実用展開のスケ

ジュールを考慮して、現行マシンで運転経験の豊富な方式を採用すべきであると判断し、SLAC 型に沿った FC の開発を強化しようとしている。

3.4 大口径加速管

昨年度 φ35 の L バンド加速管一台を製作した^[10]。加速管の外側にはソレノイド磁石を設置して数 kG の軸上磁場を供給する必要があるが、この内径は加速管の入出力カプラー部のフランジで決まり、最大限小さく設計したもののソレノイド内径は φ360 が必要である。内径の大きいことに加えて、入射器ではアラインメント用のダクトがビームライン直下を走っているため、それとの干渉しない磁石外径であることも必要で、ソレノイド磁石設計が難しく、また駆動電源等も巨大になる。これを避けるために、L バンド加速管の出力カプラーを無くした設計にすべく急遽開発を進めている。

LAS (大口径 S バンド) 加速管は、入出力部の電磁界の対称性を得るべく、二方向開口結合とし、また結合フランジはなるべく直径の大きくならない様な配慮を行う。これ以外は通常の CG (低勾配) 型の 2m 加速管である。

3.5 L バンドシステム

L バンドシステムを、陽電子キャプチャー部と DR から入射器に戻す RTL ラインの BCS (バンチコンプレッサー) システムに用いる予定である。現在 S バンドクライストロンのダイオード部設計を使い、L バンド周波数に設計したクライストロンの試験を開始した^[12]。また、真空仕様の導波管は銅又はアルミで製作するが、主要コンポーネントの開発を急いでいる。

4. エミッタンス保存

4.1 状況

これまでの KEKB 仕様入射器では、エミッタンス増大の抑制に関して本質的な改善まで踏み込んでいないのが現状であり、表 1 に示したようなエミッタンスが計測されている。SuperKEKB に対しては、電子源、陽電子源でいくら良いビームを供給できても入射器の加速途中で悪化したらまったく使い物にならないことは明白である。悪化の原因としては、各所でのディスパージョン、J-ARC での CSR (Coherent Synchrotron Radiation)、加速管からのウェーク場、等であり、これらのソースを同定しながら抑制策を練っている^[13]。震災で現入射器を用いた試験が困難になったが、まずは現在復帰したセクター 3～5 での試験や、将来敵には、セクター A からの全ビームパスを用いた試験、開発が必須である。

一例として、ウェーク場の影響を、ビーム軌道オフセットを付加することで抑制できることを示した実験例を図 5 に示した。A セクターのステアリングを振って軌道をずらすことにより、その二乗で下流 B セクターのエミッタンスが変化することを測定した例である。

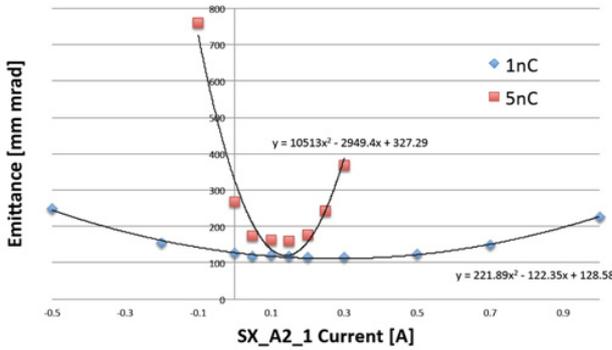


図5：ウェーク場の影響と抑制

4.2 アラインメント

KEKB での入射器のアラインメント思想は、10m 程度のユニット架台をレーザーにレーザーを通して直線上に並べ、各コンポーネントは良くアラインされた架台上に機械的な精度を保証されたレール等を基準に配置するというものである。しかし最近では架台上の配置の確認や架台自身のアラインメントを直接確認する機械が殆ど無かった。最近ではビーム輸送などから数mm以上のミスアラインメントが存在することが予想されていて、SuperKEKB で必要とされる 0.1 mm以下級のアラインメントからはほど遠いのが現状である。

SuperKEKB 対応のアラインメントの方針を探るにあたり、コンポーネントのアラインメントを直接測定したり、架台のアラインメントを本来のレーザー以外の方法で計測したりして、現状の確認を行った^[14]。これらから、数mm以上のミスアラインメントの可能性が疑われていた部分の確認も取れている。

並行して、本来のレーザーでのアラインメント計測に関わり、分割光センサーの 10 年間の運転からくる放射線劣化の定量評価や、細いレーザービームを 500m 級走らせる技術を再展開している^[15,16,17]。

これらの試験的開発を踏まえて、震災からの復興から SuperKEKB へのアラインメントを進展させるには、

1. まず伝統的な手法で架台を並べていく
2. 架台上のコンポーネントはレーザートラッカー等で確実に基準との関係が保たれることを保証できることを実現する
3. ユニット架台を適当な頻度で計測し、動きを確認する

といった方法が進められていくものとする。但し、実際の手法戦略に関しては、今後一年程度の間で決めていくことになると思われる。この際、ワイヤーや水管傾斜計等によるアラインメント計測も含めて検討するつもりである。

4.3 BBA

前節で述べたアラインメント計測の改善を行うが、実際には 50 μ m 程度のアラインメント精度を要

求されてくると思われ、これを直接アラインメントで実現するのは難しいと考える。そのため、BPM (ビームポジション計測) の精度を今の 0.1 mm から 10 μ m 級に改良し、これを用いて BBA (ビームベースアラインメント) を実施して行くことになる。現在 BPM からの信号処理での精度を上げてこれを実現すべくモジュールの改良を行っている。

4.4 パルス ST&Q とタイミングシステム

入射器では SuperKEKB へのビームに加えて PF 等へ異なるエネルギーのビームを常にパルス毎に振り分けて供給する必要がある。また、SuperKEKB の陽電子ラインと低エミッタンス電子ビームラインを分けて通過させたり、その後のラインでは電子と陽電子で異なるエネルギーのビームをエミッタンス増大なく加速していく必要があり、かなりの数のステアリングや Q 磁石をパルス毎に制御する必要があると考えている。これを実現するためには、これまで進めてきているパルス毎にハードウェアを切り替えるタイミングシステムの拡充が必要と有る^[18,19]。

4.5 診断ステーション

エミッタンス増大の抑制は重要であり、入射器の最下流に X バンドディフレクターを用いた診断ラインを構築する予定と有る。これにより、ビームの縦方向にスライスしたエミッタンス等の情報を得ることができ、制御システムを完成させていく上で重要な機能を持つことになる^[13]。

5. スケジュール

5.1 震災からの復旧

震災で入射器アラインメントは大きなダメージを受けた^[20]。縦方向には柔構造をとった架台の板バネが大きく振れ、また横方向に拘束されていたはずであるが、横方向も大きく振られたようである。しかし以後の復旧を実現可能性がある範囲に抑えるためには、極力これまでの構造を用いて復旧していくことが必要であると考えている。

高電力 RF 系や高電界加速管等、震災の影響は今後立ち上がってくるセクションや長期運転で明らかになってくる^[21]。これら安定な運転への復旧に加えて、電子源の確立、陽電子ラインの構築、DR 関連の新規構築、またその先にはエミッタンス増大の抑制の開発が待っている。

5.2 SuperKEKB コミッショニングへ

2014 年にコミッショニング開始する SuperKEKB に対して入射器はほぼ半年前、2013 年度内に運転開始準備完了を目指して開発を進めている。しかし最終ハードウェアがまだ決まっていないものもあり、今後急ピッチでそれらを固めていき、予算マンパワーを集中して確立する必要がある。また、初期にはエミッタンスは最終目標をキープするが、バンチチャージを 1nC 仕様として、電子銃内、陽電子捕獲部、DR 入射ロス、入射器内

でのエミッタンス増大、等々に関係したビーム強度に依存するメカニズムの制御は必要な開発やハードウェアを後にシフトすることができるように計画している。

5.3 今後1年間の重要開発項目

DR への入射出射部の建設に絡んで、現在入射器を二分しているシールドを1ユニット分下流に移動して、各種の開発試験を DR 関連の建設と共存させる^[22]。

RF ガン試験を 2011 年度末までに実施し、いくつか並行して設計・試験してきているシステムを総合して、A1 に構築していく電子銃のベースラインを決定する。

陽電子収束に用いる FC の設計と試作・試験を行い、実機への目処をつける。加えて小口径ソレノイドを可能とする L バンドキャプチャー加速管を設計・開発する。これをもって 1 年後には、ターゲット部の試験を開始する。

震災からの入射器復旧を行い、SuperKEKB への開発試験に重要なセクションを優先的に立ち上げていく。この際、SuperKEKB でのアラインメント実現方法を探りながら進める。

BPM の高分解能化を徐々に進め、並行してエミッタンス増大抑制の試験を部分的にも進めていく。

参考文献

- [1] K. Akai and H. Koiso, “SuperKEKB 設計の進展と建設状況”, MOPL02、第 8 回加速器学会
- [2] T. Kamitani et al., “UPGRADE OF KEKB INJECTOR LINAC FOR SUPERKEKB”, WELH03、第 7 回加速器学会、姫路、2010 年 8 月
- [3] M. Yoshida et al., “SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス DAW 型高周波電子銃用レーザーの開発”, MOPS115、第 8 回加速器学会
- [4] T. Natsui et al., “SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス DAW 型高周波電子銃の開発”, TUPS132、第 8 回加速器学会
- [5] X. Zhou et al., “SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス DAW 型高周波電子銃用ファイバーレーザーの開発”, MOPS116、第 8 回加速器学会
- [6] F. Miyahara et al., “Development of low emittance photo-cathode RF-gun for SuperKEKB”, TUPS034、第 8 回加速器学会
- [7] M. Kikuchi et al., “Design of Positron Damping Ring for SuperKEKB”, TUPEB054、IPAC2010, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010.
- [8] N. Iida et al., “Design of the Positron Transport System for SuperKEKB”, THPD004、IPAC2010, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010.
- [9] T. Kamitani et al., “SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの陽電子ビーム増強”, TUPS028、第 8 回加速器学会
- [10] K. Saito et al., “陽電子捕獲用 L バンド加速管の製作”, TUPS125、第 8 回加速器学会
- [11] S. Ushimoto et al., “フラックスコンセントレータ用磁場測定システムの開発 (2)”, MOPS051、第 8 回加速器学会
- [12] M. Kubozaki et al., “L バンド 40MW クライストロンの開発”, TUPS158、第 8 回加速器学会
- [13] M. Yoshida et al., “SuperKEKB 入射器におけるエミッ

- タンス保存”, TUPS025、第 8 回加速器学会
- [14] K. Kume et al., “水準器を用いた床面変動測定”, MOPS156、第 8 回加速器学会
- [15] T. Suwada et al., “KEKB 入射器におけるフレネルレンズを用いた新しいレーザーアライメント”, MOPS145、第 8 回加速器学会
- [16] M. Sato et al., “KEKB 入射器におけるレーザーアライメントシステム”, MOPS150、第 8 回加速器学会
- [17] K. Hisazumi et al., “KEKB 入射器におけるレーザーアライメント用光検出器の高精度取付け”, MOPS152、第 8 回加速器学会
- [18] T. Kudo et al., “KEK 入射器における電子ログブックシステムの更新”, MOPS094、第 8 回加速器学会
- [19] S. Kusano et al., “KEK 入射器における組み込み EPICS を利用したソフトウェアの開発”, MOPS095、第 8 回加速器学会
- [20] K. Suzuki et al., “東日本大震災からの KEK 電子陽電子入射器真空系の復旧作業”, TUMH09、第 8 回加速器学会
- [21] Y. Imai et al., “東日本大震災からの KEK 電子陽電子入射器高周波源の復旧作業”, TUPS151、第 8 回加速器学会
- [22] H. Honma et al., “KEK 電子・陽電子入射器の現状”, TUPS033、第 8 回加速器学会