

LINAC UPGRADE FOR SuperKEKB

Toshiyasu Higo^{#)}, Mitsuo Akemoto, Yoshio Arakida, Dai Arakawa, Atsushi Enomoto, Shigeki Fukuda, Kazuro Furukawa, Yasuo Higashi, Hiroyuki Honma, Naoko Iida, Mitsuo Ikeda, Eiichi Kadokura, Kazuhisa Kakihara, Takuya Kamitani, Hiroaki Katagiri, Miho Kurashina, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Katsuhiko Mikawa, Takako Miura, Fusashi Miyahara, Takashi Mori, Hiromitsu Nakajima, Katsumi Nakao, Takuya Natsui, Satoshi Ohsawa, Yujiro Ogawa, Masanori Satoh, Tetsuo Shidara, Akihiro Shirakawa, Tsuyoshi Suwada, Hiroshi Sugimoto, Toshikazu Takatomi, Tateru Takenaka, Yoshiharu Yano, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida, Lei Zang, Xiangyu Zhou, Daisuke Satoh^{A)}

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

^{A)} Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

Abstract

Upgrade of the injector linac for the SuperKEKB has been progressing targeting the reduction of emittance by a factor of 100 or so and the increased current by a factor of five. In order to realize these, 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 whole linac. These upgrades should meet consistently with the simultaneous injection not only to the SuperKEKB rings but also to the Photon Factory rings.

The linac upgrade scenario has decided to meet the commissioning of the SuperKEKB at time $T=0$ in 2014 with a moderate current, at least 1nC per bunch. We admit the delay, if inevitable by any reason, to reach the full bunch charge for a few years. New key hardware 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 a large-aperture RF acceleration system, and the emittance preservation through the whole linac by improving component alignment and reinforcing beam based alignment. By taking the advancement of the developments into account and also considering the budgetary situation into account, some design/strategy choices are made with some still to be decided by reflecting the critical study result.

SuperKEKB に向けた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に課せられたアップグレード要求は、昨年度学会発表の表 1 を参照されたい²⁾。本稿では、昨年から一年間の開発進展状況と今後 $T=0$ に向けた要求を実現するために決断したこと、また $T>0$ でのアップグレード構想についても述べる。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) 収束方式と大口径 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。

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で必要な場合を想定して、今のところ DC ガンを残してある。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、捕獲、加速された陽電子は、セクター2 下流端から取り出して DR に入射してエミッタンスを下げる。この後、バンチ圧縮をしながら再度セクター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) での加速で行われる。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。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。

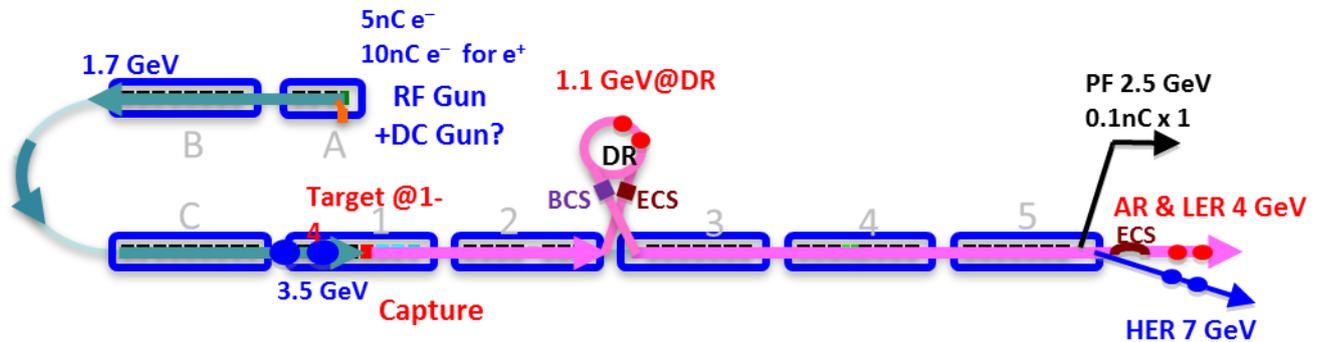


図1：SuperKEKBでの入射器構成

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、①SuperKEKB HERへの低エミッタンス、高チャージバンチの供給、第二に②SuperKEKB 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、③放射光リング（PFやAR）への電子供給である。

①に関しては、これまでKEKBで運転してきた電子ビーム（ $\sim 1\text{nC} \times 2$ ）の5倍のチャージを低エミッタンスで供給する必要があると、光カソードのDAW型RFガンを用いてこれを実現することにした^[3]。本来図1のセクターAで開発を進めるべきだったが、震災後の入射器復旧状況を鑑みて、図2に示したように、まずセクター3の3-2ユニットに導入した。ここでは、266nm、4mJ、30psのNdYAGレーザー光パルスを斜め入射してIr₅Ceカソード面を照射し、4MW入力（表面電界 $\sim 10\text{ MV/m}$ ）で運転するDAW型空洞を用いてバンチングと加速を行い、3.4MeVで引き出す。

空洞は図3に示したDAW空洞で、表面電界を抑えてバンチングを効率的に行える大電流に向けた空洞を基本に据えている^[4]。できるだけ小パワーでの量子効率を上げる試みとして、266nmの短波長の選択と斜め入射を併用している。使用するカソードは、長寿命を念頭におき、熱電子も取り出せる真真空的に安定な材料としてIr₅Ceを選択し、量子効率 10^{-4} を目指している^[5]。

これまでの試験で4.8nC/バンチは引き出されており、エミッタンスを確認中である。また図2に示したように、このビームはセクター3～5を通して、4nCを加速・輸送できるところまで確認できている。今後はこのガンをPF入射等に用いることにより、電荷は少ないながらも長期の運転評価を進めるとともに、大電流に関する経験も積む目論見である。現在はこれと並行して本来の設置場所（A-1）でのシステム立ち上げを行っている。更に実機使用に有効と考えているファイバーレーザーの開発も進めている^[6]。

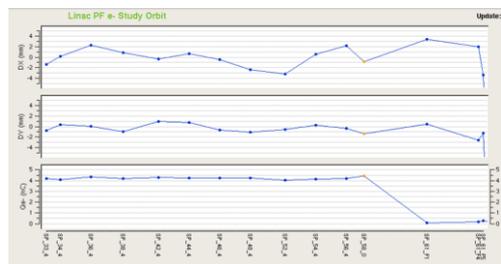


図2：3-2ユニットでのRFガンセットアップ、及びセクター3～5の加速・輸送例



図3：Ir₅CeカソードとDAW型RFガン空洞

3. 陽電子ビーム

3.1 構成

KEKBでの陽電子バンチチャージ（1nC）に比べて数倍（4nC）の強度を要求されており、しかもDR（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り、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、ターゲット直後にフラックスコンセントレータ (FC) とそれに続く大口径 LAS 加速管部へ導き、横方向のアクセプタンスを稼いで収量を向上させる⁷⁾。

陽電子ラインの構成を図 4 に示した。10nC 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、下流に最高磁場数 T の FC を置き、この軸上磁場から下流の 0.4T 程度のソレノイド磁場へ断熱的磁場をつなげる。このソレノイド磁場に包まれる大口径 (φ30) の S バンド加速管 (LAS : Large aperture S-band)、2m×6 本でキャプチャー部を構成する。この直後にシケインを設け、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 2m×6 本追加したのち、既存の S バンド加速管 7.5 ユニット (2m×30 本) で DR 1.1GeV までのエネルギー付与を行うことになる。

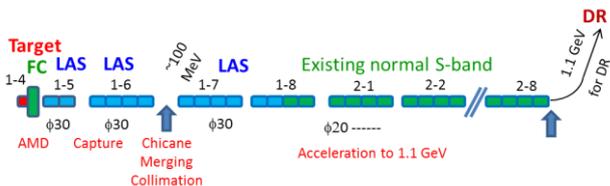


図 4 : 陽電子生成～DR へ

3.2 FC による AMD 収束

ターゲット直後の磁場収束系は、KEKB でのパルスコイルに変えて FC (Flux Concentrator) を採用する。これにより 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。ターゲット直後の高磁場も重要ではあるが、それにもまして下流の断熱マッチング部の形状が重要であることがわかってきた。現在は、SLAC により開発され、IHEP, China や Frascati に採用されている FC をベースに展開すべく、銅材料をワイヤカット加工して機械振動計測や図 5 に示すような磁場測定を行っている⁸⁾。



図 5 : FC 試験コイルと磁場計測

3.3 キャプチャー部加速周波数の選択

昨年の段階では、DR への入射ロスを減らすこと、及び陽電子収量の増加に対して、キャプチャー部の周波数は S バンド× (5/11)、即ち L バンド周波数が効果的であると判断していた。しかしバンチチャージが 1nC 程度であれば S バンドのシステムでも可能であり、L バンド周波数の効果を最近再評価始めている。T=0 へのシステムとしては、L バンドシステムの高コストもふまえて S バンドで進めることに決定した。今後 2015 年には DR への入射状況を確認できるので、その時点のスタディを通して L バンドシステムの必要性を判断することを考えている。

3.4 大口径加速管

LAS 加速管は、ビームホール口径をなるべく大きくとるべく、直径 φ31.86~29.97 の CG 設計とした。いくつかの加速管パラメータを表 2 に示す。外周をなるべく小さな内径のソレノイドで覆うことをもくろみ、出力カプラーセルの導波管フランジはカプラーセルに埋め込む型としてある。これにより、既存のソレノイド (内径 φ200) を活用できる。

表 1 : LAS 加速管パラメータ

セル数 (レギュラー+カプラー)	57+2	セル
有効加速長	2064	mm
ビームホール直径	31.86~29.97	mm
群速度/光速	4.2 - 3.5	%
シャントインピーダンス	48~46	MΩ /m
10MW 入力時の電界	6.93	MV/m
SLED 使用時の電界	16.42	MV/m

3.5 L バンドシステム

L バンド加速システムの、設計、製作、高電力試験、を進めてきた。先に述べたように、T=0 では L バンドを使用しないが、T>1 以降に必要な場合を想定して最低限の開発は進めておくことにしている。これまでクライストロン単体試験、及び加速管にフィードして高電界試験⁹⁾を実施した。加速管のバンドが狭いことに関連してクライストロンの動作に高周波数側に発振が見られ、この原因究明と対策を検討すべく調査開始した。加速管にはソレノイドを外周に設置するため、その大きさを抑制すべく、加速管の下流側の導波管を省き、コリニアロードとする設計を進めている^{10,11)}。

3.6 陽電子捕獲システム設計

陽電子捕獲部はターゲットから発生するシャワー起源の放射線による運転中の周辺放射線レベルの上昇のみでなく、ビームラインの放射化の問題が重要事項である。短時間で、しかもなるべく離れた距離からの作業で真空フランジ外しができるように、特殊脱着装置の検討を始めた。また特に FC~第一加速管の間でできる磁場の落ち込みが収量減少につながるの、ソレノイドでカバーできない長さをなる

べく短くし、また外側に大きなソレノイドを設置して補償することを検討している。特に故障時の交換作業に関連して、重量シールド、ケーブル、導波管等の脱着、加速管の抜き出し方法、架台の切り離し等の方法につき検討を進めている。レール方式で重いパーツを移動することを併用することを含めて検討している。

4. エミッタンス保存

4.1 状況

エミッタンスを悪化させる原因として、ディスパージョン、加速管等のウェーク場、J-ARC での CSR、等々の影響を念頭にしている。まずはコンポーネントのアラインメントが重要であり、これに向けての開発状況を次節以降に述べた。CSR では ARC でのバンチ長に依存するが、BNS ダンピングの活用の可能性や、オフセットインジェクションを行うことでウェーク場の効果をキャンセルすること等、シミュレーションより議論されているが、これらをいかに組み合わせることでエミッタンス増大を抑制するかは今後のビームスタディを含めた開発によるところが大きい。

4.2 アラインメント

これまでの KEKB 入射器のアラインメント思想は、8.6m の標準ユニット架台をまずレーザービームを基準として直線上に並べ、各コンポーネントはこれに機械的な精度を確保して設置するというものである。しかしビームラインは、大きいところでは数mmオーダーで曲がったりずれたりしていることが何度かの計測からわかってきていたし、そもそも震災によりアラインメントは無に帰してしまっている。

これに対して、 $10\mu\text{m}$ 級のエミッタンスを保存するためには、数十~100m 程度の間では 0.1mm 、全長にわたっては 0.3mm の許容誤差 (σ) となることがシミュレーションより得られている^[12]。これだけで要求精度を機械的、光学的な測量から直接的に実現することは現実的に不可能であるが、まず初期アラインメントとして我々は以下の方法で始めることとした。

1. レーザー光基準にユニット架台を設置する
2. 架台上のコンポーネントはレーザートラッカー等で架台上の基準に対して機械的に設置する
3. ユニット架台を適当な頻度で計測し、必要なら架台位置を修正する

レーザーPDの位置計測精度^[13]は、これまでのビームからの放射線劣化により5%以上劣化したPDを除いて構成しているので、現在は $\pm 0.3\text{mm}$ 程度と考えている。また架台上に設置される機器の機械設置精度は、架台上の基準に対して $\pm 0.1\text{mm}$ 程度と判断している。これを組み合わせると、コンポーネントの初期アラインメントは $\pm 0.5\text{mm}$ よりは良いという精度と考える。現在最長直線距離500mを通すことができ計測が可能になるはずで

あるが、これだけで最終要求値を満足することは不可能であり、これを埋めるには、次節に述べるBBAの力を借りねばならないことは論を待たない。



図6 : 500m 先でのレーザースポット ($4\sigma=30\text{mm}$)

4.3 BBA に必須の高分解能 BPM

最も重要な開発は、BPM (ビームポジション計測) の分解能を $10\mu\text{m}$ 級に改良することである。ストリップラインに誘起されるバイポーラーパルスはこれまで8ビットのオシロスコープでその最大値を捉えてきたのみであり、分解能は $100\mu\text{m}$ 程度であった。サンプリング点数を増やしてその rms より計測する方法をとるだけで、 $60\mu\text{m}$ 程度に向上することがわかった。更に向上させるために、16ビットのADCを用いて、フィルター幅を狭め、4電極からの信号の電気長合わせを行って、 1nC での分解能 $10\mu\text{m}$ 以下を狙って開発している。3 BPM 方式での計測から、試作機で既に 0.3nC ビームに対して分解能 $20\mu\text{m}$ が得られており、現在改良型を準備中で、秋の運転で特性を確認する予定である^[14]。この結果をふまえて今後の計画に反映させることにしている。

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。これを実現するためには、これまでも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である。

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である。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る^[12]。10MW クライストロンは既に製作し、ディフレクターも SLAC で組立の最終段階である。

5. スケジュール

5.1 スケジュール

SuperKEKB リングへの入射 ($T=0$) は 2014 年であり、これに沿って入射器アップグレードを進める

