

# KEKB 電子陽電子入射ライナックの改造計画について

紙谷 琢哉<sup>1</sup>、ライナックコミッションンググループ、電子陽電子入射器グループ  
 高エネルギー加速器研究機構 電子陽電子入射器  
 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

KEK 電子陽電子ライナックは、KEK B-ファクトリー (8 GeV 電子、3.5 GeV 陽電子) 及び PF, AR 放射光リング (2.5 GeV 電子) の入射器として、安定した運転を続けている<sup>[1]</sup>。特に KEBK リングへは、約 90 分毎という短い時間間隔で、しかも効率良く入射を行うことで、時間積分ルミノシティー値の向上に寄与している。現在、KEKB は当初設計ピークルミノシティー値の 7 割を超える高い性能 ( $7.35 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ ) をすでに達成しており<sup>[2]</sup>、CP 対称性の非保存測定などの成果を上げている。さらに将来を見据えてより高い精度での実験結果を求めるために、一桁高いルミノシティー値を実現できるような改造計画 (SuperKEKB) のための検討を始めている<sup>[3]</sup>。この際に入射器に関しては、陽電子の入射エネルギーを 3.5 GeV から 8 GeV に上げること、また陽電子及び電子のビーム強度を数倍高くすることが必要となる。これらの増強の実現可能性の検討状況について報告する。

## 1. はじめに

KEK B-ファクトリーでは、非対称エネルギーでの衝突実験が行われるため、ライナックから 8 GeV 電子ビームを HER (High Energy Ring) へ、3.5 GeV 陽電子ビームを LER (Low Energy Ring) へ入射している。図 1 に示すように、ライナックは J 字型の配置をしており、陽電子生成部は全長のほぼ中間点に設置されている。1 次電子ビームは、約 4 GeV で生成標的に照射され陽電子を生成する。これがライナックの後半部分で 3.5 GeV まで加速され、LER に入射される。また、電子入射の際には、生成標的はビームライン脇に移動し、ビームは全長に渡って 8 GeV まで加速され HER に入射される。

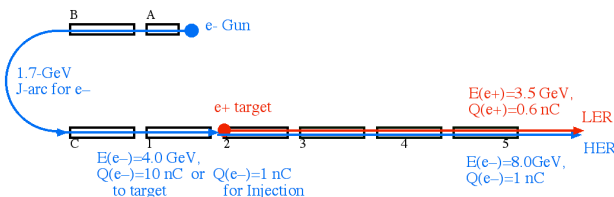


図 1 : KEBK ライナックのレイアウト

入射ライナックの基本的なビームパラメータと入射性能について表 1 にまとめる。

	電子ビーム	陽電子ビーム
入射エネルギー	8.0 GeV	3.5 GeV
パルスあたり電荷量	1.0 nC	0.6 nC
規格化エミッタンス	$0.8 \times 10^{-6} \text{ m}$	$2.5 \times 10^{-6} \text{ m}$
エネルギー拡がり全幅	0.2 %	0.5 %
入射率	3.0 mA/sec	1.5 mA/sec

表 1 : 入射ライナックビームパラメータ

KEKB では、電子 1100 mA、陽電子 2600 mA という大電流を蓄積して衝突させることにより、高いルミノシティー値を達成しているが、これよりさらに一桁高い性能を目指す SuperKEKB では、より高い蓄積電流値が必要とされる。これらのスペック値の変化について、表 2 にまとめる。

	KEKB	SuperKEKB
電子エネルギー	8.0 GeV	→ 3.5 GeV
陽電子エネルギー	3.5 GeV	→ 8.0 GeV
電子蓄積電流	1100 mA	→ 9400 mA
陽電子蓄積電流	2600 mA	→ 4100 mA
設計ルミノシティー	$1.0 \times 10^{34}$	→ $1.0 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$

表 2 : KEBK と SuperKEKB のパラメータ比較

SuperKEKB のビーム仕様でまず注意するべき点は、電子ビームと陽電子ビームのエネルギーが入れ替わっていることである。これは、放射光により真空ダクトから発生した電子雲による陽電子ビームの不安定性への対策である。KEKB では LER の大部分にわたって光電子放出抑制用のソレノイドコイルが設置されたことにより、電子雲の効果を大幅に減少させることができたが、SuperKEKB においてはビーム蓄積電流が大幅に増えるので、これでは不十分になる可能性がある。そこで根本的対策として、高いほうのエネルギーのビームを陽電子にすることが想定されている。エネルギーが高くなるのに反比例して電子雲からの影響が小さくなるためである。

もう一つの注目点は、蓄積電流が数倍大きくなっていることである。一般的に、ビーム-ビーム相互作用の観点より、電子と陽電子の蓄積電流の比は、それらのエネルギーの比の逆になるのが望ましいとされている。そこで陽電子と電子の入れ替えの別のメリットとして、陽電子の蓄積電流の方が小さくなる。その結果、SuperKEKB になると電子の蓄積電流は現在の 8.5 倍になるが、陽電子の方は 1.6 倍に

<sup>1</sup> E-mail: takuya.kamitani@kek.jp

とどまる。電子に比べて、陽電子の入射ビーム強度を上げるのは難しいから、これは入射器にとってはありがたいことである。

さてまとめると、SuperKEKB へのアップグレードにおいて、入射ライナックに課される増強の要点は2つあり、陽電子ビームの入射エネルギーを3.5GeVから8GeVに上げる“エネルギー増強”と、電子及び陽電子ビームの強度を数倍高くする“ビーム強度増強”である。次節以降では、これらのそれぞれについていかにして実現するかについて詳しく述べる。

## 2. エネルギー増強

現在の入射ライナックは、電子入射部、陽電子生成部及び56基のレギュラー加速ユニットから成り立っている。各加速ユニットは、1台の50MW Sバンドクライストロン、1基のSLED型RFパルス圧縮器、4本の2m長加速管から構成されており、平均加速電界21MV/mでユニット当たり約160MeVの加速能力を持っている。陽電子加速部の加速能力は最大4.8GeVであり、8GeV入射には全く不足である。陽電子ビームを8GeVまで加速できるようにライナックを改造するスキームについて、以下に述べる2つの案について検討が行われている。

### 2.1 加速電界倍増スキーム

最も単純に加速エネルギーを高くするには、加速電界を高くすればよい。しかし現在と同じ加速管で加速電界を2倍にしようとするれば、供給するRFパワーを4倍にしなければならない。RF源の能力を4倍にするには、コスト的、設置スペース的に困難があるし、また加速管がその高電界に耐えられるかどうかは自明ではない。同じRFパワーでも高い加速電界が得られる、より周波数の高い加速構造を用いることを考える。リニアコライダーでは、さまざまな周波数についてのR&Dが進められ、有望な成果が得られているが<sup>[4]</sup>、SuperKEKB用としてはCバンドの加速ユニットを採用することを検討している。それは、すでに実用的なクライストロンが開発されていること、加速管の開口径がある程度大きくとれること、などの理由による。

このスキームでは、図2に示すように陽電子加速部の後ろ4分の3をCバンドユニットに置き換える。また、陽電子ビームはその手前の1GeVになったところで一旦ダンピングリングに入れられエミッタンスを縮小させる。

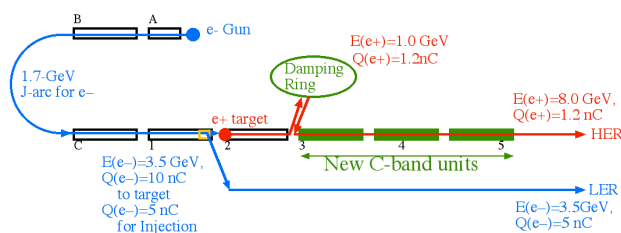


図2：加速電界倍増スキーム

各ユニットは、2台の50MW Cバンドクライストロン、2台のCERN-LIPS型RFパルス圧縮器、4本の2m長加速管で構成され、平均加速電界42MV/mが得られる。これにより、陽電子ビームは8GeVまで加速され、HERに入射される。電子ビームは、標的手前で取り出されてLERに入射される。このスキームでは、CバンドコンポーネントのR&Dをしなければならないという難しさはあるが、これは将来のリニアコライダーにつながる事柄でもあり有意義である。また、ビームラインレイアウトがシンプルであり、ビーム運転もやりやすいというメリットがある。

### 2.2 陽電子ビーム還流スキーム

エネルギー増強のもう一つのスキームとして、生成された陽電子ビームを上流側へ還流させて、これを加速して8GeVに到達させるやり方についても検討を行っている。

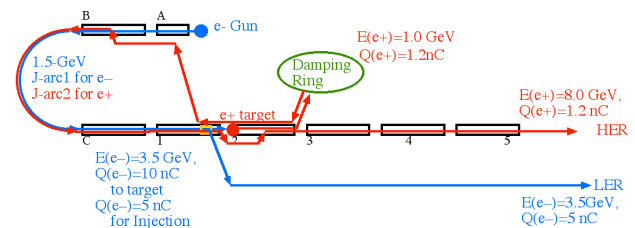


図3：ビーム還流スキーム

ビームラインレイアウトの例を図3に示す。この例では、生成された陽電子ビームを1GeVまで加速してからダンピングリングに入射して、次のRFパルスのタイミングまで待たせてこれを取り出して、輸送ラインを通して上流側まで運び、ライナックに再入射してまた加速する。このとき、この陽電子ビームの後方には、次の陽電子生成用1次電子ビームが並走し、同じRFパルスによって両方が加速される。陽電子生成標の手前で電子と陽電子は分離され、電子は標的に照射され、陽電子はバイパスラインにより標的を迂回する。この陽電子は、少し先でライナックビームラインに合流し、標的からやって来た、まだエネルギーの低い陽電子ビームと並走して加速される。しばらく先で、低エネルギー陽電子はビームラインから取り出されダンピングリングに向かう。高エネルギー陽電子は、さらにライナック終端まで加速され、8GeVでHERに入射される。電子ビームを入射する際には、標的手前で3.5GeVになった電子ビームを取り出し、輸送ラインを通してLERまで運ぶ。

このビーム還流スキームは、加速管やRF源についてはあまり増強しなくて済むメリットがあるが、ビームラインレイアウトが複雑になり、電子と陽電子、或いはエネルギーの異なる2つの陽電子ビーム、を同じビームラインを通す必要がある、などビーム運転上難しい要素が多くある。

### 3. ビーム強度増強

SuperKEKB でのビーム強度増強による入射時間の改善について述べる前に、まず現在の KEKB でのビーム入射の現状について簡単に説明する。

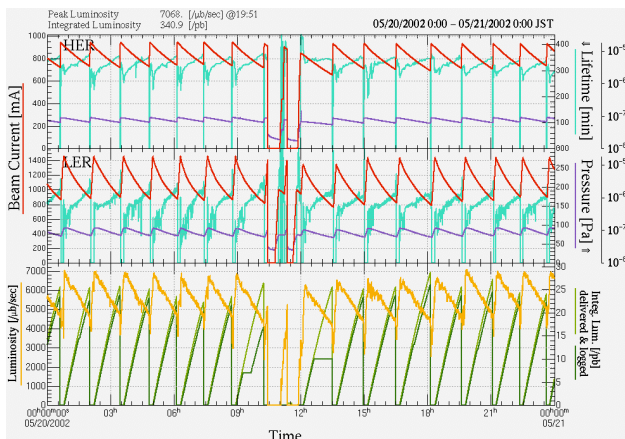


図4：典型的な KEKB 運転状況

図4に、ある1日の KEKB の運転状況の例が示されているが、上段、中段の赤線が、それぞれ電子、陽電子の蓄積電流、下段の黄線がルミノシティの時間変化を表している。約1時間半おきに、電子、陽電子の入射を行っていることがわかる。またこれ以外に、何らかの原因でビームが不安定になりアポート（投棄）されるのが時折発生し、電流をゼロから蓄積していくようすもわかる。これらビーム入射中は、衝突実験のデータ収集はストップするので、実験にとってはデッドタイムとなる。

SuperKEKB では蓄積電流が大幅に増え、現在と同じ入射率のままでは入射によるデッドタイムの割合が大きくなりすぎるので、ライナックからのビーム強度を増強することが必要となる。

まず、電子については蓄積電流が 8.5 倍にも増加する。これに対処するために、現在のビーム電荷量を 1 nC から 5 nC に増やすことを想定している。電子銃からの電荷量をこのように増やすことには問題がない。なぜならば、すでに定常的に陽電子生成用に 10 nC の電子ビームを生成、加速しているからである。しかし、電荷量を増やすとエミッタンスやエネルギー拡がりについては悪化することが予想されるので、リングの入射アクセプタンスとの兼ね合いについては今後検討する余地がある。

次に、陽電子については蓄積電流が 1.6 倍になるが、これへの対処として、生成標的直後のソレノイド収束系の強磁場コイルを SLAC で使用されているようなフラックスコンセントレーター型に置き換えることで捕獲陽電子のエネルギーアクセプタンスを大きくして、陽電子生成量を約 2 倍を増やすことを考えている。

なお、現在 KEKB では入射バンチ数を 2 つに増やすことで入射率を倍増させるスタディーが行われ<sup>[1]</sup>、ほぼ実用に使える目処が立っているが、残念ながら SuperKEKB においてはダンピングリングが 2 バンチを取り扱うのは困難であり、陽電子ビーム強度を増やすことに関しては、この方策は使用できない。しかし、後で述べるように、電子陽電子同時入射を可能にするために 2 バンチを利用することができるので、これについては、さらに検討及びスタディーを進める予定である。

### 4. その他の検討事項

先に述べたビーム入射によるデッドタイムの影響を小さくするのに有効な一案として、衝突実験のデータ収集は続けたまま、入射を行う連続入射運転についてのスタディーが行われている<sup>[1]</sup>。この運転モードでは、蓄積ビームの減少分は定常的に補充されているのでビーム電流は一定となる。ただし、現在では電子入射と陽電子入射ではライナックの状態を切り替えなければならないので、陽電子については連続入射を行っても、電子は同時には入射できないので電子の蓄積電流は減少する。このため、ある程度の時間間隔で電子入射を行う必要はあるが、それでも入射によるデッドタイムは非常に小さくなる。

しかしこの連続入射運転では入射ビームによるバックグラウンドが測定器に対して与える悪影響が問題となる。これを調べるためのビームスタディーが行われ、その対策が検討されている。この対策に目処が立てば、KEKB だけでなく SuperKEKB においても連続入射運転が行われることになるであろう。

さらに、この連続入射運転モードをより理想的に使うためには、電子と陽電子を同時に入射することができることが望ましいので、ライナックの改造においてもそれに配慮しておくことが重要である。これを実現するためには、現在スタディーが進んでいる 2 バンチ加速を利用することができる。つまり、陽電子生成標的の手前で早いキッカーを用いて、1 つ目のバンチは標的に行かせて陽電子を生成しこれを加速して HER に入射し、2 つ目のバンチはビームラインから取り出して、これを別のトランスポートラインで LER に入射すれば、電子と陽電子の同時入射を実現することができる。

### 参考文献

- [1] 小川雄二郎、“KEK 電子・陽電子入射器の現状” 本 Proceedings 参照
- [2] KEKB ホームページ  
<http://www-acc.kek.jp/WWW-ACC-exp/KEKB/KEKB-home.html>
- [3] SuperKEKB 検討グループホームページ  
<http://acc-physics.kek.jp/%22Super%20KEKB%22/home.htm>
- [4] JLC C-band グループホームページ  
<http://c-band.kek.jp/>