

## KEKB INJECTOR LINAC UPGRADE

Takuya Kamitani\*, Electron/Positron Injector Linac Group,  
KEKB Linac Commissioning Group

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

A design study of the KEBB injector linac upgrade for the SuperKEKB project has been performing. Recent change in the SuperKEKB design from high-current scheme to low-emittance scheme has posed a change in the injector upgrade design. The main issues in the injector upgrade are, (1) a new electron source with smaller emittance for injection to the KEBB electron ring, (2) a positron focusing solenoid in a matching section with higher magnetic field for larger energy acceptance, (3) a positron capture section with L-band accelerating structures for larger transverse momentum acceptance, (4) a positron damping ring for reducing positron emittance before injection to the KEBB positron ring. A present status of the design consideration of these issues are described.

## KEKB 入射ライナックのアップグレード計画

### 1. はじめに

KEKB-factory 加速器はこれまでに世界最高のピークルミノシティー値 ( $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-2}$ ) を達成しているが、さらにそれより一桁以上高いルミノシティーを目指した改造計画 (SuperKEKB) についての検討が行われている。SuperKEKB の設計に関してのこれまでの様々な検討の結果、大きな方針の変更が行われ、電子陽電子入射ライナックの改造方針も変更する必要が出てきた。

まず、第 1 点は電子と陽電子のビームエネルギー入れ替えの不採用である。KEKB では現在、電子 8.0 GeV と陽電子 3.5 GeV のエネルギーのビーム衝突実験が行われているが、SuperKEKB では陽電子蓄積リングでの電子雲によるビーム不安定性の対策として陽電子を 8.0 GeV、電子を 3.5 GeV と入れ替えることが当初は想定されていた。これに向けて、ライナック後半部の加速ユニットを S-band 加速管によるものから C-band 加速管によるものに置き換えて、加速電界を現在の 2 倍の 42 mV/m に上げることで 8.0 GeV の陽電子入射を可能にすることを目指して、C-band 加速ユニットの開発を進めてきた。C-band 加速ユニット 1 セットを実際にライナックに設置して実用運転に使用できるレベルに達している。最近の方針変更に従って、ライナックの加速ユニットの大規模な C-band 化を行うことは取りやめとなった。しかし、改造に伴って加速エネルギーの余裕を持たせるために、数セットの C-band 加速ユニットの増設は必要となるので C-band 開発の結果は有効に利用することができる。

次に、第 2 点はナノサイズビーム衝突方式の採用である。ルミノシティーを向上させるための方策として、蓄積電流値を現在より数倍に増加させる方式を検討していたが、最近では蓄積電流をあまり増やさず、低いエミッタンスのビームを用いて衝突点でのビームサイズを小さくする方式の方が実現性が高いと考えられている。この場合、ライナックからは電子に関しては現状より 1 桁、陽電子に関しては 2 桁低いエミッタンスのビーム

を入射することが必要となる。これに向けて、まず低エミッタンスのビームを作ることのできる電子源の開発を行う。また、陽電子については二次粒子として生成されるため、元のエミッタンスを小さくすることは原理的に困難であり、その代わりにライナック途中にダンピングリングを設けて、エミッタンスが減少した後にビームを取り出して、さらに加速してから入射することにする。なお、この低エミッタンスビーム衝突の方式の場合、蓄積電流はあまり増やす必要はないが、ビーム寿命が現在に比べて 10 分の 1 に短くなるため、ライナックからの入射ビーム強度は、電子、陽電子ともに 4~5 倍に増やす必要があると考えられる。陽電子のビーム強度を増やすには、生成標的直後でビームを強く収束するための高磁場ソレノイドの改良及び陽電子捕獲部の開口径を大きくして、より多くの陽電子をつかまえることが必要となる。この論文では、これらの改造重点項目についての設計検討の現状について報告する。

### 2. 低エミッタンス電子源

現在、KEKB 入射ライナックで使用されている電子源はバリウム含浸型の熱陰極で 200kV のパルス電圧を用いる電子銃とビームの時間構造を S バンド周波数に関しては単バンチ構造にするための 2 台の低い周波数 (114 MHz と 571 MHz) のサブハーモニックバンチャー (SHB) 空洞、2856 MHz のプレバンチャー空洞とバンチャー加速管から構成されている。なお、ビーム電荷量増強のため、同じ RF パルス内で 96 ns 離れてもう一つのバンチを加速して計 2 つのバンチを入射している。この電子源では、電子蓄積リングに入射するための低電流ビーム (電荷量 1nC/bunch) と陽電子生成用の大強度ビーム (10nC/bunch) を生成する。

現在想定されている SuperKEKB の低エミッタンス設計案によれば、ライナックからの入射電子の規格化エミッタンス ( $1\sigma$  値) は水平方向には  $\gamma\epsilon_x < 870 \mu\text{m}$ 、垂直方向には  $\gamma\epsilon_y < 35 \mu\text{m}$  でなければならない。垂直エミッタンスの方がより厳しいのは、蓄積リングの平衡エ

\*E-mail: < takuya.kamitani@kek.jp >

ミッタンスの特性を反映している。これに対して、現在の電子源で生成されるビームのエミッタンスは入射用低電流ビームの場合でも  $\gamma\epsilon_x$ 、 $\gamma\epsilon_y$  とともに  $100 \mu\text{m}$  程度であり、SuperKEKB の電子リングに入射するには大きすぎる。また、パンチ当たりの電荷量に関しては  $1 \text{ nC}$  から  $5 \text{ nC}$  に増やすことを目標としている。

表 1: 参考となる低エミッタンス電子源の例

特性	仕様	SCSS <sup>[1]</sup>	ATF <sup>[2]</sup>	LCLS <sup>[3]</sup>
ビーム電荷量	5nC	1	1 ~ 5	1
パンチ数	2	1	1 ~ 100	1
パルス繰返し	50Hz	60	12.5	120
エミッタンス	< 35 $\mu\text{m}$	1	<10	1
電子銃陰極		CeB <sub>6</sub>	Cs <sub>2</sub> Te	Cu
単パンチ生成		パンチ 圧縮	10 $\mu\text{J}$ レーザー	2mJ レーザー

そこで実用化されている低エミッタンス電子源のデータと仕様との比較を表 1 に示す。SCSS 用電子源<sup>[1]</sup> はレーザーは不要であるがパンチ圧縮系が大がかりになるのでコストと収容スペースの点でそのまま採用するのは難しい。ATF-RF 電子銃<sup>[2]</sup> は、電荷量は十分取れそうであり、エミッタンスも他と比べると大きいものの SuperKEKB の仕様は満足する。単パンチはレーザー光で RF 電子銃の Cs<sub>2</sub>Te カソードを照射することにより生成されるのでシステムとしてはコンパクトであり、仕様条件をほぼ満足するシステムである。但し、カソードの寿命やレーザーの安定性などまだ検討すべき点はある。LCLS 用電子源<sup>[3]</sup> も同じく RF 電子銃とレーザーを用いているが、カソードに銅を用いているので寿命は長いがすでにかなり大出力のレーザーを使用しており、現在の仕様の  $1 \text{ nC/bunch}$  より電荷量を増やすのは難しくそうである。

これらの電子源を参考として、SuperKEKB 用の電子源の設計検討を進めている。いずれにしても陽電子生成用の大強度ビーム ( $10 \text{ nC/bunch}$ ) を同じ低エミッタンス電子源で生成するのは難しいと思われるので、これは既存の電子源で行うこととして使い分けられることになると思われる。また、ライナック途中でのエミッタンス増大についても注意しておく必要がある。

### 3. 新型陽電子収束ソレノイド

陽電子のビーム強度を 4 倍に増やすには、一次電子ビームのエネルギーと強度を増やすのは困難であるので、陽電子の捕獲効率を増やすことが現実的な方策である。現在、生成標的から出た角度拡がりの大きな陽電子を収束するマッチング部に使用されているのは、 $2 \text{ T}$  の磁場強度で磁場の有効長さが  $45 \text{ mm}$  のパルスソレノイドコイルである。この下流に DC ソレノイドによる  $0.4 \text{ T}$  の磁場強度で  $8 \text{ m}$  の長さわたり捕獲部加速管をカバーしている磁場へ連続的に繋がっている。これに替えて、 $6 \text{ T}$  以上の磁場強度で長さが  $200 \text{ mm}$  以上にわたってゆっくり磁場が小さくなるようなソレノイドを開発することができれば、陽電子のエネルギーに対してより広いアクセプタンスを持つ収束系を実現することがで

きる。このような特性を持つソレノイドの候補として、flux concentrator 型ソレノイドマグネットと超伝導ソレノイドコイルの両方の可能性について検討を進めている。今後の検討、試作、試験等の結果を得て、2、3 年後までにどちらを採用するかについて結論を出す予定である。

#### 3.1 flux concentrator 型ソレノイドマグネット

flux concentrator は SLAC の SLC ライナックでも用いられたソレノイドで、円筒型の銅のブロックに円錐形の穴をくりぬいたものに、中心軸からある方向にだけ狭いスリットが切っており、その外側に一次コイルが巻いてある。この一次コイルに大きなパルス電流 (ピーク  $30 \text{ kA}$ 、パルス幅  $25 \mu\text{s}$ ) を流すと強い誘導電流が銅の穴に沿って円周状に流れて、特に穴が一番狭くなった部分に強いソレノイド磁場を作る。現在、ロシアの BINP と共同で開発している実機用プロトタイプはピーク磁場で  $10 \text{ T}$  という非常に高い磁場強度を達成している。但し、構造的な問題から軸対称でない横方向磁場成分がかなり強い ( $B_T=0.3 \text{ T}$ ) のでビームが曲げられるという難点がある。

このタイプのマグネットは真空チェンバーの内側に置いて使用されるが、パルスマグネットなので機械的振動が必然的に伴い冷却水配管等の破壊、亀裂などによる加速器内部への水漏れ事故については十分な注意が必要となる。このため実際のビーム運転に使用するには長期耐久性が問題となるので、事前の運転試験を KEK のテストスタンドで行う予定である。また、現在の KEK ライナックの陽電子源にパルスコイルの代わりに設置して、どれくらい陽電子捕獲効率が上がるかについてのビームスタディーも KEKB 運転終了後に行う予定である。

#### 3.2 超伝導ソレノイドコイル

強いソレノイド磁場を作る別の候補としては超伝導コイルがある。flux concentrator に比べて、超伝導コイルを使うことには多くのメリットがある。まず磁場の軸対称性が非常に良いこと、コイル配置を適切に設計すれば目的とするゆっくりと変化する磁場分布を作れること、電源としては数百 A 程度の DC 電流で電圧値も低いのでコンパクトなもので済むこと、DC 的な磁場なので誘導電流の影響が無く標的を磁場の一番強いところに置くことができることが挙げられる。しかし、最大の難点は陽電子生成標的からの強い放射線によりコイルが加熱されてクエンチに至る可能性があることである。放射線をシールドするためにはコイルの内側に十分な厚みのシールド材を置く必要があり、その場合コイル径サイズが大きくなってビーム軸上に十分な強さの磁場が作れなくなる恐れがある。これを克服する一つの可能性としては、近年開発が進んでいる高温超伝導線材を用いることで、入熱量の限界値を高くすることである。しかしまずは通常のニオブ系超伝導線材を用いてどこまでの磁場が可能であるかの設計検討を行う。放射線による加熱については、精度の良い放射線熱量計を製作

して現在の標的周辺での発熱量の測定を行うとともに、放射線シミュレーションを行ってこの比較によりコイルへの入熱量の正確な評価を進めている。これによりクエンチ限界に達しない範囲での現実的なコイル設計及びシールド設計を行うことが可能になる。一方、超伝導ソレノイドとそのクライオスタットのプロトタイプを製作して、これに対するビーム照射試験を行い実験的にもクエンチ限界を定量的に評価することを予定している。さらに、高温超伝導線材による入熱限界の改善についても検討したい。

#### 4. Lバンド加速管による陽電子捕獲部

陽電子捕獲部での横方向運動量アクセプタンスの大きさはその加速管の開口径の2乗に比例するので、これを大きくすると効果的である。Sバンドの加速管では単純に開口径を大きくすると加速電界が大きく低下してしまうが、より低い周波数のLバンド帯の加速管を用いれば口径を現在の2倍にしても必要な程度の加速電界を作ることができる。その運転周波数としては、既存の他のSバンド加速管(2856 MHz)と蓄積リングのRF周波数(509 MHz)の兼ね合い及び96 ns離れた2バンチ構造に矛盾しない値として1298 MHzを採用する。

この加速管のために必要となるLバンドのクライストロンについては、既製品の20 MW級よりも出力の高い30 MW級のものの開発を進めている。加速管については、進行波型と定在波型の両方について検討している。捕獲部に用いる加速管はソレノイド磁場中に置かれるので、電界放出された電子が磁場で曲げられて加速構造表面を繰り返し叩くため、放電が起きやすい。また標的から出た粒子のある程度の部分が加速構造にぶつかることも放電しやすい原因となる。このため通常以上に放電が起きにくいように設計を工夫する必要がある。進行波型加速管を用いしかも短い構造に分割して充填時間を短くすれば、RFパルス幅を短くすれば放電対策には効果的である。しかし、パルス圧縮空洞などを用いなければ加速電界はあまり高くできない。定在波型を用いなければ加速電界は高くできるが、RFパルス幅が長い放電に対しては不利であると思われる。加速構造をどのタイプにするかについては現在まだ設計検討中であるが、設計が決まれば試作機を作って磁場中での放電特性などの測定を行うことを予定している。

#### 5. ダンピングリング

ライナックからの入射陽電子の規格化エミッタンス( $1\sigma$ 値)は $\gamma\epsilon_x < 380 \mu\text{m}$ 、 $\gamma\epsilon_y < 15 \mu\text{m}$ でなければならない。陽電子はもともと標的物質内の電磁シャワーで二次粒子として生成されるため、多重散乱の影響を大きく受け大きな角度拡がりを持って出てくる。エミッタンスは $\gamma\epsilon_x$ 、 $\gamma\epsilon_y$ ともに現状でも2400  $\mu\text{m}$ 程度であり、L-band加速管を用いるとこれがその2倍以上に大きくなる。これを小さくするには、ライナックの途中でダンピングリングに陽電子ビームを入れて、小さな曲率半径でビームを周回させて放射減衰でエミッタンスが小さく

なってから取り出すのが現在実現可能な唯一の方策である。

現在のSuperKEKBの設計案では、陽電子をライナックで1.0 GeVまで加速したところで周長135 mの用ダンピングリングに入射して、40 ms後に取り出すことを想定している。出射時のエミッタンスは $\gamma\epsilon_x = 28 \mu\text{m}$ 、 $\gamma\epsilon_y = 2 \mu\text{m}$ となっているので陽電子リングに入射するのに十分に小さい値となっている。なお、ライナックからは最短で20 ms間隔でビームがダンピングリングに来るが、その場合でも必要な40 msの周回時間を確保するために2セットのビームを長さ方向に距離をおいて同時に周回させ、別々に取り出せるように設計されている。また、それぞれのビームはライナックからの96 ns離れた2バンチが一つのセットとなる。リングの周長はこれら2セットの2バンチビームを収めるのに必要となる長さとして入射、出射キッカーの立ち上がり立ち下がり時間の性能から決定されている。

ライナックからダンピングリングへはエネルギー拡がりの大きなビームが来るので $R_{56}$ 成分を持つトランスポートラインとSバンド加速管による補正加速により位相空間分布を変換させてバンチ長は長くなるがエネルギー拡がりを圧縮するエネルギー圧縮システム(Energy Compression System)を設置して、入射効率を高める予定である。また、ダンピングリングからのビームのバンチ長は長くそのままライナックで加速するとライナック終端でのエネルギー拡がりが大きくなってしまいうため、ダンピングリング出口でSバンド加速管のゼロ加速位相付近で使用してバンチの前と後ろにエネルギー勾配を付け、その後のトランスポートラインでの $R_{56}$ 成分によりちょうどバンチ長が圧縮されるようなシステム(Bunch Compression System)を使用する予定である。

ダンピングリングについては、現在その建屋、リングのビームラインの各種コンポーネント、入射出射ビームライン及びECS、BCSの設計検討が進められている。

#### 6. まとめ

SuperKEKBの設計方針変更に伴い入射ライナックの改造は、電子陽電子ともにこれまでより低エミッタンスでしかも電荷量はこれまでの4倍程度のビームを入射することが要求されている。これに向けて、RF電子銃による新規電子源、陽電子収束用の6 Telsa級のソレノイド、陽電子捕獲部用のL-bandのクライストロン及び加速管の開発と陽電子ダンピングリングの設計検討を進めている。

#### 参考文献

- [1] 新竹積, "X線自由電子レーザー計画の概要", 第6回日本加速器学会, 原研東海, 2009, WOFLA02.
- [2] K. Hirano *et al.*, "High-intensity multi-bunch beam generation by a photo-cathode RF gun", NIM-A, Vol. 560, May 2006, p.233-239.
- [3] C. Limborg *et al.*, "RF Design of the LCLS Gun", <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/technotes/lcls-tn-05-3.pdf>.