

UPGRADE OF KEKB INJECTOR LINAC FOR SUPERKEKB

Takuya Kamitani*, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Mitsuo Ikeda, Atsushi Enomoto, Satoshi Ohsawa, Yujiro Ogawa, Kazuhisa Kakihara, Hiroaki Katagiri, Eiichi Kadokura, Miho Kurashina, Masanori Satoh, Tetsuo Shidara, Akihiro Shirakawa, Takashi Sugimura, Tsuyoshi Suwada, Tateru Takenaka, Katsumi Nakao, Hiromitsu Nakajima, Toshiyasu Higo, Shigeki Fukuda, Kazuro Furukawa, Hiroyuki Honma, Hideki Matsushita, Takako Miura, Katsuhiko Mikawa, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida, Naoko Iida, Mitsuo Kikuchi, Masafumi Tawada, Toshihiro Mimashi, Yuji Kojima, Kota Nakanishi, Kenji Hosoyama, Toshiya Sanami
High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

An upgrade of the KEKB-factory for SuperKEKB has started to achieve 40 times higher luminosity. It requires the KEKB linac to inject lower emittance and higher intensity electrons and positrons. A photo-cathode RF gun will be developed for the low emittance electrons. A positron capture section with a stronger focusing solenoid and larger aperture accelerating structures will replace existing components. A damping ring will be constructed to make positron emittance sufficiently small for injection. A present status of developments of these new components are described.

SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの改造計画

1. はじめに

KEKB-factory 加速器ルミノシティを現在の 40 倍に増強する SuperKEKB 計画がスタートしようとしている。これにともない電子陽電子入射ライナックも改造して性能向上させる必要が出てきた。表 1 に入射ライナックに関連する現在の KEKB と SuperKEKB のマシンパラメータの比較を示す。まずリングの蓄積電流が現在の約 2 倍となる一方ビーム寿命が一桁短くなるので、ライナックからの電荷量は 4~5 倍増加させる必要がある。またビームのエミッタンスがこれまでより一桁以上小さくなるので、ライナックからのビームのエミッタンスも小さくする必要がある。

表 1: KEKB/SuperKEKB 入射器マシンパラメータ

パラメータ	KEKB		SuperKEKB	
	e ⁺	e ⁻	e ⁺	e ⁻
エネルギー [GeV]	3.5	8.0	4.0	7.0
リング蓄積電流 [A]	1.6	1.2	3.6	2.6
ビーム寿命 [min]	150	200	10	10
バンチ電荷 [nC]	(10), 1	1	(10), 4	5
バンチ数	2	2	2	2
エミッタンス [μm]	2100	100	10	20
エネルギー幅 [%]	0.125	0.05	0.07	0.08
バンチ長 σ_z [mm]	2.6	1.3	0.7	1.3

(*) バンチ電荷のカッコ内の値は陽電子生成用一次電子

ライナック増強の基本方針としては、まず低エミッタンス電子ビームを作るために RF 空洞と光陰極を用いた電子源を開発する。陽電子ビームの強度を増やすために、陽電子生成標的直後の集束ソレノイドを現在の 2 T 磁場の空芯パルスコイルに代えて 6 T 程度の磁場を発生させられる強いソレノイドを使用し、かつ、これまでよ

り大口径の加速管を使用することにより陽電子の捕獲効率を向上させる。陽電子ビームのエミッタンスを小さくするために陽電子加速部の途中にダンピングリングを新設する。

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及び要素開発の現状について報告する。なお、昨年(2009年)8月時点でのライナック増強検討の状況については文献^[1]において報告されているが、この1年で設計検討が進展した結果も含めて更新した内容を報告する。

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では、バリウム含浸型タングステン熱陰極に 200kV のパルス電圧をかけて約 2 ns 長さの電子ビームを電子銃より引き出し、2 台のサブハーモニックバンチャー空洞 (114 MHz と 571 MHz)、及び 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る RF バンチングセクションにより FWHM 長で 10 ps 程度の短バンチビームを生成している。また、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、KEKB 電子リング (HER) に入射するための低電流ビーム (電荷量 1 nC/bunch) と陽電子生成用の大強度ビーム (10 nC/bunch) 及び放射光施設の PF 電子リング入射用低電流ビーム (電荷量 0.1 nC/bunch) を生成している。なお、PF 用電子ビームのみは 1 バンチだけで入射している。

表 1 にあるように、SuperKEKB の HER リングに入射するビームのエミッタンスは規格化値で $20\mu\text{m}$ 以下であることを要求されているが、現在の HER 入射用ビームのエミッタンスは $100\mu\text{m}$ 程度であり要求値より 5 倍程度大きい。さらに、SuperKEKB HER リング入射用ビームはそのバンチ当たりの電荷量についても現在の運転値 1 nC に対して 5 nC に増やすことを要求されている。

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

現在の電子源でも、陽電子生成用に 10 nC/bunch の電荷量のビームを生成しているの、5 nC 電荷量のバンチを生成することは十分可能であるがそのエミッタンスは 1 nC の場合の値より数倍大きくなると考えられ、SuperKEKB の要求より一桁大きくなってしまふ。

そこで既存の電子源とは独立に設置する、新たな低エミッタンス電子源の検討を進めている。その設計方針としては、まずカソード面積を小さくして ($200 \rightarrow 7 \text{ mm}^2$) 固有エミッタンスを小さくする。そして、加速電界を高くして ($5 \rightarrow 170 \text{ MV/m}$) 空間電荷力によるエミッタンス悪化を減らす。このために、現在の DC 的な電圧をかける代わりに RF 空洞による高周波電界を用いることで非常に高い加速電界値を実現する。さらに、現在の熱陰極では生成するバンチの長さがグリッド電圧パルスの長さにより制限されて 2 ns より短くすることが困難であるため、サブハーモニックバンチャー空洞などの RF バンチングセクションによるバンチ長圧縮過程が必須であるが、この過程においてエミッタンスの悪化が生じる。そこで、RF バンチングセクションを無くして、その代わりにカソードから電子ビームを引き出すときにすでに短いバンチを生成させることができるように、短パルスのレーザー光をカソードに照射して光電子放出させるような光カソードを採用する。

SuperKEKB の運転形態としては長期連続運転が要求されるために、光カソードとレーザーシステムの安定性は重要である。銅カソードとその低い量子効率を補うための短い波長 (205 nm) で高出力のレーザーのシステムを用いる可能性について検討をしているが、このようなレーザーの開発は容易ではないことがわかってきたので、 Cs_2Te などの比較的量子効率の高いカソード材質を用いたシステムについても検討を行う必要があると思われる。

なお、この低エミッタンス用電子源で必要とされる電荷量 (5 nC/bunch) を達成したとしても、陽電子生成用の大強度ビーム (10 nC/bunch) を同じ電子源で生成するのは難しいと思われる。しかし陽電子生成用のビームはエミッタンスがある程度大きくても問題が無いため、これの生成については既存の電子源で行うこととしてビームパルス毎に切り替えることにより、使い分けることになると思われる。

3. 新型陽電子収束ソレノイド

現在、生成標的から出た陽電子を収束するマッチング部には 2 T の磁場強度で磁場の有効長さが 45 mm の空芯パルスソレノイドコイルが使用されている。この磁場はこの下流に約 8 m の長さにわたって続く DC ソレノイドによる 0.4 T の磁場との組み合わせにより、QWT (quarter wave transformer) と呼ばれるタイプの陽電子収束系を形成する。これはほぼ様な強い磁場が短い長さでのみ存在する磁場形状を成しており、いわば単色レンズ的な狭いエネルギーアクセプタンスを持つ ($10 \pm 2 \text{ MeV}$ 程度)。これに対して、例えばピークで 6 T 程度の磁場強度を持ち、長さが 200 mm 以上にわたってゆっくり磁場が小さくなり 0.4 T の DC 磁場につながるような磁場分布の収束系は AMD (adiabatic matching device) とよばれ、断熱的な変化により、いわば色消しレンズのようなワイドバンド的な広いエネルギーアクセプタンス

を持つ ($1 \sim 20 \text{ MeV}$)。このため AMD 系では QWT 系に比べておおよそ 2 倍以上、陽電子捕獲効率を増やすことができる。AMD 系用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。なお、どちらを選択するかについては、以下に詳述するような双方のプロトタイプを用いた試験の結果を踏まえて、2011 年末ぐらいまでに決定したいと考えている。

3.1 フラックスコンセントレータ型ソレノイド

フラックスコンセントレータは円筒型の導体のブロックに円錐形の穴をくりぬいたもので、その外側の一次コイルに大きなパルス電流 (ピーク 30 kA、パルス幅 25 μs) を流すと強い誘導電流が穴に沿って流れて、穴の内側に非常に強いソレノイド磁場を作る。現在、ロシアの BINP と共同で開発を行っており、今年 (2010 年) 10 月に実機プロトタイプ及びそのパルス電源が BINP より KEK に送られてくる予定になっている。フラックスコンセントレータはその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ので、その磁場の 3 次元的な分布を測定してマッピングデータを作成することが、精度の高い粒子シミュレーションを行って陽電子捕獲効率を評価するためには重要である。この磁場分布測定を行うためのピックアップコイルとその可動ステージシステム及びその電圧信号のデータ収集系の開発を行い、現在、既存の空芯パルスソレノイドコイル予備機を用いて磁場分布測定の試験を行っている [2]。

この 10 月にはフラックスコンセントレータ及びそのパルス電源の立ち上げと磁場分布測定を行う予定である。さらに 12 月までは単体での長期運転試験を行って機械的な耐久性を調査し、来年 (2011 年) 1 月より KEKB ライナック陽電子生成部のパルスソレノイドに置き換えてフラックスコンセントレータを設置して、陽電子生成のビーム試験を行い陽電子生成性能の測定を行う予定である。

3.2 超伝導ソレノイドコイル

超伝導コイルを使用できると、磁場の軸対称性が非常に良いことや、コイル配置を適切に設計すれば理想的な AMD 用磁場分布を作れることなどのメリットがある。しかし問題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超伝導状態が破れるクエンチに至る可能性があることである。特に心配な事は、ライナックのビームは非常に短いパルス (10 ps 長) になっているために超伝導コイルの発熱が非常に短い時間にパルス的に起こることにより、通常の DC 的な加熱に比べて過敏でクエンチが起こりやすいのではないかという懸念である。

このクエンチ限界値について定量的に調べるために、サンプル超伝導ソレノイド (内直径 54 mm、外直径 108 mm、長さ 67 mm、NbTi 線導線径 $\phi 0.6 \text{ mm}$ 3800 ターン、最大電流値 115 A、最大磁場約 6 T) を用いて、浸け置き型クライオスタット内に取り付けて、ライナック終端部のテストビームライン上に設置してビーム照射試験を行った。パルス当たり電荷量約 0.6 nC の 8 GeV 電子ビームを 7 mm 厚のタングステン板に照射して放射線を発生させ、直後に鉛板を置きその厚みを変化させる (0~90 mm) ことで超伝導ソレノイドに当たる放射線量

を変化させた。その各条件で通電電流値を変化させてクエンチが発生する電流値を測定した。この測定値について放射線シミュレーションより推定される温度上昇値との関係を調べたところ、パルス加熱による過敏性は特に無く、これを時間的に平均して通常のDC的加熱に換算したものは通常期待されるクエンチ限界値の特性と同様であるという結果が得られた。

現在、陽電子収束用に使うための実機により近いプロトタイプ(ソレノイド内側に照射標的を置けるような形状のもの)とそれのためのクライオスタットを製作しており、これをライナック途中のビームダンブラインでパルス当たり電荷量約 20 nC の 1.7 GeV 電子ビームを用いて試験することにより、実際の陽電子生成部に近い放射線環境での特性評価を今年(2010年)年末にかけて行うことにより、そのデータに基づいて実機にほぼ準ずる超伝導ソレノイドの設計に進みたいと考えている

4. 大口径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DCソレノイド磁場の強さに対しては1乗に比例し、一方そこに置かれる加速管の開口径には2乗で比例するので、開口径を大きくすることが効果的である。当初は開口直径を現在のSバンド加速管(2856 MHz)の2倍にあたる40 mmにすることを想定して、より低い周波数(1298 MHz)のLバンド加速管を想定して検討を進めてきた。これはこの開口径ではSバンド加速管では加速電界が非常に低くなってしまったためであった。

しかし、ダンピングリングで想定されるアクセプタンス値との兼ね合いから開口直径は30 mm程度でよいことになった。これであればSバンド加速管でも通常よりは大きくあるがRFパルス圧縮空洞等を使用することでLバンド加速管と同等以上の加速電界を達成することが可能である。また、LバンドではRF波長が長いためパンチの前と後ろでのエネルギー差が小さく縦方向アクセプタンスについてSバンドより有利であると考えられたが、ダンピングリングへのエネルギーアクセプタンスにおいては陽電子捕獲部より下流にある多くのSバンド加速ユニットによるエネルギー拡がりの影響の方が大きく、シミュレーションでの比較の結果によれば、大口径Sバンド加速管を用いた場合でもLバンド加速管に比べて陽電子ビーム強度で10%程度の差しかないことがわかった。

Lバンド加速管を用いた場合、LバンドRF源を新設しなければならないことや大型のDCソレノイドが必要になることなどコストの点では不利である。アクセプタンス以外の観点、ウエーク場によるエミッタンス悪化や放射線による放電問題などについての比較検討は必要であるが、もしも特に問題が見つからなければ大口径Sバンド加速管を採用することになるであろう。

5. ダンピングリング

SuperKEKBでは電子のみならず陽電子についても低エミッタンスのビームを入射することが要求されているが、陽電子は自然界には存在せず高エネルギー電子を金属標的に当てて発生する電磁シャワーの二次粒子として生成されるために必然的に大きなエミッタンスを持っている。このため、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、放射減衰によりエミッタンスが小さくなってから取り出すのが現実的な方策である。

まず SuperKEKB 陽電子ダンピングリングのパラメータのリストを表2に示す。また、ダンピングリング設計の詳細については文献^[3]を参照されたい。

現在のライナックから陽電子ビームを取り出す部分の設置が比較的容易で、ダンピングリングを設置するのに必要な敷地が確保できる場所を検討した結果、陽電子生成部からライナック終端までの約320 mのうちの始めの4分の1のところ(第2セクター終端部)から横方向にビームラインを伸ばした位置にダンピングリングを建設することとなった。ここでの陽電子ビームエネルギーは約1 GeVであり、ダンピングリングの入射エネルギーは当初1.0 GeVと設定されたが、後の検討によりコヒーレントシンクロトロン放射光(CSR)によるビーム不安定性が問題となり、これを回避するために入射エネルギー設計値を1.1 GeVに上げることになった。また、ダンピングリングの入射エネルギーに対してライナックでの陽電子ビームの加速エネルギーが十分足りるようにするために、陽電子生成部をこれまでより約40 m上流側に移設することにより寄与する加速ユニットの数を6から9に増やした。これによりクライストロン不調時の予備として使えるスタンバイユニットを1台設けることができ、また新設される大口径加速管のユニットにおいて加速電界が低いことを補うことができる。

表 2: SuperKEKB 陽電子ダンピングリングパラメータ

ビームエネルギー	1.1 GeV
パンチトレインの数	2
トレイン当たりのパンチ数	2
リング周長	136 m
エミッタンス減衰時間	10 ms
入射ビームエミッタンス	3700 μm
出射ビームエミッタンス	92 [H], 7 [V] μm
出射パンチ長	7.7 mm

ライナックからは96 ns離れた2つの陽電子のパンチを一度にダンピングリングに入射して、減衰時間の4倍にあたる40 ms後に取り出す。また50 Hz繰り返し(20 ms間隔)での入射にも対応できるように、2つのパンチトレインを同時に周回させられるように設計されている。LERリング入射時に特に問題となる垂直方向のエミッタンスはダンピングリング出口で7 μm であり、要求仕様の10 μm を満足している。

ライナックからダンピングリングへのビーム入射効率を向上させるために、エネルギーの違いにより軌道長差のつくトランスポート系とSバンド加速管による補正加速を用いて縦方向位相空間分布を変換させてパンチを長くする代わりにエネルギー幅を小さくするシステム(Energy Compression System)を使用する。また、ダンピングリングからライナックへ入射する際には、逆にエネルギー幅を拡げる代わりにパンチ長を短くするシステム(Bunch Compression System)を使用する。パンチ長を短くすることで下流のライナックでの加速エネルギー差が小さくなりLERリングまでのトランスポートラインでのビームロスを低減することができる。BCSにおける補正加速にもSバンド加速管を用いる予定で

あるが、Lバンド加速管を用いることによりバンチ長をより短くできる可能性について指摘されているので検討を行う必要がある。

6. まとめ

SuperKEKBの入射ライナックでは現在に比べて、電子陽電子ともに一桁以上低エミッタンスでしかも電荷量はこれまでの4~5倍程度の大強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、陽電子捕獲部用の大口径加速管による加速ユニットの開発と陽電子ダンピングリングの開発を進めている。

参考文献

- [1] 紙谷琢哉、他, “KEKB入射ライナックのアップグレード計画”, 第6回日本加速器学会, 原研東海, 2009, WOOPC02. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2009pubfinal/papers/woopc02.pdf
- [2] 牛本 信二、他, “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”, 第7回日本加速器学会, 姫路, 2010, WEPS081.
- [3] M. Kikuchi *et al.*, “Design of positron damping ring for SuperKEKB”, IPAC 2010, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>