

UPGRADE OF THE POSITRON SOURCE FOR SUPERKEKB

Takuya Kamitani*, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Mitsuo Ikeda, Atsushi Enomoto, Satoshi Ohsawa, Yujiro Ogawa, Kazuhisa Kakahara, 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, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Katsuhiko Mikawa, 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

The KEKB linac will be upgraded for SuperKEKB to inject electron and positron beams with several times higher intensities and more than one order of magnitude smaller emittances. A damping ring will be constructed to achieve a small emittance for positrons. The positron capture section of the KEKB linac will be upgraded with a new positron focus matching solenoid and larger aperture accelerating structures to improve positron capture efficiency. The capture section will be relocated to have sufficient energy margin for damping ring injection. The layout of the beam-line will be rearranged to install beam focusing elements to increase beam acceptance. This paper reports on a new positron beam-line layout, a new positron capture section and R & D status of the candidates of the positron focus matching solenoid.

SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの陽電子ビーム増強

1. はじめに

2014 年に運転開始を予定している SuperKEKB 加速器では入射ライナックから電子、陽電子ともにこれまでより電荷量は 4~5 倍大きくかつエミッタンスが一桁以上小さいビームを入射することが要求されており、これを実現するためにライナックの増強改造が進められている [1]。

陽電子ビームのエミッタンスを小さくするためには、ライナック中間部にダンピングリングを新設してライナックからのビームを一旦ここで冷却してから取り出してライナックの後半部分で加速してから入射する。このダンピングリングの詳細については別の文献 [2] を参照されたい。ダンピングリングとライナックの接続部分の位置は建物の都合上決まっており、ここで入射するのに必要なビームエネルギーを確保するために陽電子生成部をこれまでより上流側に移設する。

陽電子ビームの強度を増やすためには、まず陽電子生成標的直後の集束ソレノイドをより強く長い磁場を出せるものに置き換えてエネルギーアクセプタンスを大きくすることと、陽電子捕獲セクションにおいてより大口径の加速構造に置き換えて横方向運動量アクセプタンスを大きくすることが重要である。また陽電子捕獲セクションのアクセプタンスを大きくすることに対応して、ダンピングリングに至るまでのビーム収束系のアクセプタンスも大きくする必要がありビームラインレイアウトを改造し収束電磁石を増強する。またこれまで同様にパルス毎のビーム切り替えを実現することも必要である。

この論文では上に述べたような SuperKEKB のための陽電子増強に向けた改造の基本方針とキーとなるコン

ポーネントの開発状況について報告する。

2. 陽電子ライナックレイアウト

2.1 KEKB での陽電子ライナック

まず、これまで使用されてきた KEKB ライナックの陽電子ビームに関する部分の構成についてまとめておく。KEKB ライナックはそれぞれが 1 台の RF 源のクライストロンに対応した長さ約 10m の "加速ユニット" と呼ばれる構成要素 58 台からできており、加速器トンネル内には各ユニットごとに通常 4 本の 2m 長 S バンド加速管を搭載した架台が設置されている。平均加速電界は 21MV/m であり、ユニット当たり約 160 MeV の加速能力を持っている。なお、2 台の加速ユニットのみは C バンドの機器を用いて約 2 倍の加速電界を実現している。KEKB ライナックは 7~8 台の加速ユニットごとに "セクター" と呼ばれる領域に区分けされている。最上流から 3 つのセクターの名称はそれぞれ A, B, C と呼ばれ KEKB のためのアップグレードの際に増設された部分であり、それに続いて 1, 2, 3, 4, 5 と順番に番号付けされたライナック創設以来の 5 つのセクターが並ぶ。KEKB ライナックは 8.0 GeV の電子ビームと 3.5 GeV の陽電子ビームを KEKB の蓄積リングに入射できる。電子は全長にわたって加速することで 8.0 GeV のエネルギーを達成するのに対して、陽電子生成部はセクター 2 の先頭に置かれ、セクター A からセクター 1 までの 27 台の加速ユニットで約 4GeV まで加速した電子を一次ビームとして、これをタングステン標的に当てて二次粒子として生成された陽電子を捕獲セクションと呼ばれるソレノイド収束系とその内側に置かれた加速構造で捕まえて加速できるビームにする。これをその下流のセクター 2 からセクター 5 までの 31 台の加速ユ

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

ニットで 3.5GeV まで加速する。

2.2 SuperKEKB 陽電子ライナックのレイアウト

これに対して、SuperKEKB の陽電子入射に関してはこれまでよりも一桁以上小さなエミッタンスのビームが要求されているので、ライナック途中にダンピングリング (DR) を新たに設けることになった。DR 設計上のエミッタンス減衰時間及びリング内でのコヒーレント放射光によるビーム不安定性の考察より、DR でのビームエネルギーは 1.1GeV と決まり、設置する敷地とライナックビームラインと接続する部分の建設の都合より、ライナックからのビームはセクター 2 終端のビームスイッチヤードより分岐させて取り出すこととなった^[2]。陽電子生成部を現在と同じくセクター 2 の先頭に置いた場合セクター 2 終端でのビームエネルギーが約 1GeV にしかならないため、より上流側に移設して DR までに陽電子を加速するユニットの数を増やすことにした (図 1 参照)。

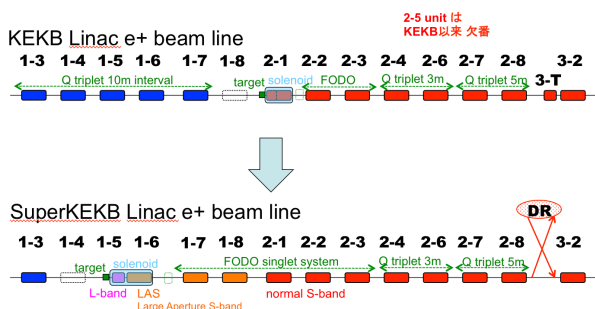


図 1: SuperKEKB 陽電子ライナックレイアウト

余裕分を含めた最大加速エネルギーの考察から、陽電子生成標的を 1-5 ユニットの先頭部に置くことにする。陽電子捕獲セクション (1-5, 1-6 ユニット) を出たところでのビームエネルギーは 120 MeV であり、これより下流の DR までに 9 台の加速ユニットがある。そのうち 2 台は後述するように大口径 S-band 加速管を用いるため加速エネルギーが通常ユニットの 160MeV より低く 80MeV である。これを考慮するとライナックから DR へ送るビームエネルギーの最大値は 1400MeV であり、入射エネルギー仕様値 1100MeV に対して 300MeV の余裕がある。しかし安定した長期運転のためには、どれか 1 台の加速ユニットが不調になった場合に代役となる予備 (スタンバイユニット) を置いておく必要がある。1 台分 160MeV のエネルギーは普段は使えない。そして残りの 140MeV の余裕分はエネルギー拡がりを小さくするために加速位相のピークから 15 度程度ずらした位相で加速する分や入射エネルギー調整用ユニットでの可変範囲を確保するために必要となる。このようにこの配置であれば、適切な量のエネルギー余裕分も含めて十分な入射ビームエネルギーが持てる。

2.3 陽電子収束系のアクセプタンス強化

ビーム収束系を設計するための横方向位相空間アクセプタンス値としては、陽電子ビーム強度を向上させるためにこれまでより 2 倍大きな値である $\gamma\epsilon=6000 \text{ mm.mrad}$ (1σ 値) を確保することを目標とした。ダンピングリン

グの設計もこの値に基づいている。捕獲セクションでの横方向運動量アクセプタンスの大きさは長周期用 DC ソレノイド磁場の強さ B_f と、そこに置かれる加速管の開口半径 a に対して $B_f a^2$ に比例する。アクセプタンスを 2 倍にするためには B_f を 2 倍高くするか、或いは a を $\sqrt{2}$ 倍大きくする必要がある。DC ソレノイド磁場値を 2 倍高くするのはマグネット設計上困難であるので、代わりに大口径の加速構造 (L-band 加速管或いは大口径 S-band(LAS) 加速管) を採用することとした。この捕獲セクションの改造については後で詳述する。

陽電子捕獲セクションを出た後のビームは四極マグネットの周期系により収束する。この収束系のアクセプタンスは四極マグネットの周期間隔 L とビームラインの開口半径 a に対して、 a^2/L に比例する。周期間隔 L を短くするには加速管の外側から巻くタイプの四極マグネットにする必要があるが、開口半径 a を大きくするために例えば L-band 加速管を使用するとその外径サイズが大きいため四極マグネットの磁極間内径が 240mm と大きくなり必要な磁場勾配が確保できなくなる。この兼ね合いとして、陽電子捕獲セクションの下流に置かれる 2 つの加速ユニット (1-7 と 1-8) には大口径 S-band(LAS) 加速管を採用する。これにより加速管外径サイズはこれまでの直径 120mm から 140mm と若干大きくなるが、開口直径は 20mm から 30mm と 1.5 倍に大きくすることができるので現実的な四極マグネット設計の範囲で大きなアクセプタンスを実現することができる。

この 2 台の LAS 加速管のユニット及びそれに続く 3 台の従来型 S-band 加速管を搭載した加速ユニット (2-1, 2-2 と 2-3) においては、ビーム収束系は四極マグネットのシングレットが交互にならぶ FODO 系となる (図 1 参照)。これより下流では四極マグネットは 3 つ組のトリプレットが加速管と加速管の間に置かれる形となる。この場合、四極マグネットの磁極間内径はビームサイズが収まる程度のダクト径だけで決まるので非常に小さくて済み (半径 11.5mm)、小型のマグネットで必要な磁場勾配を作ることができる。加速ユニット 2-4 と 2-6 においては四極トリプレットが 2m 長加速管 1 本おきに置かれ (周期長約 3m)、加速ユニット 2-7 と 2-8 においては 2m 長加速管 2 本おきに置かれる (周期長約 6m)。ちなみに 2-5 ユニットは歴史的経緯により KEKB のための改造後は欠番となっている。2-8 ユニットを出た後、陽電子ビームはスイッチヤードの方へ曲げられ、ビームのエネルギー拡がりを小さくするための装置 (ECS) を経てビームトランスポートラインを通り、DR に入射される^[3]。DR に入った陽電子ビームは 40ms の時間周回した後エミッタンスの小さい質の良いビームとなって出射されるが、ビームバンチの長さが長くなっているためバンチ長を圧縮するための装置 (BCS) を経てライナックに再入射される。このビームはセクター 3, 4, 5 にある 24 台の加速ユニットで 4.0GeV まで加速される。このビームはライナック終端部で 2 つめの ECS 装置を通り、ビームトランスポートラインを経て陽電子蓄積リング (LER) に入射される。KEKB では電子 8.0GeV と陽電子 3.5GeV で衝突が行われていたが、SuperKEKB では電子 7.0GeV と陽電子 4.0GeV に変更されたので、ライナックから 4.0GeV の陽電子ビームを供給することが

必要となるが、セクター 3, 4, 5 にある全加速ユニットによる最大到達ビームエネルギーは 4940MeV であり、スタンバイユニットを複数台用意してもなおかつ十分な余裕がある。

2.4 パルス毎ビームモード切り替え

SuperKEKB への入射では KEKB の時と同様にライナックからパルス毎に電子入射と陽電子入射を切り替える運転モードが用いられる。これを実現するためにパルス毎に RF 加速位相を切り替えることやパルスステアリングマグネットを用いたビーム軌道補正が行われるが、大部分の四極マグネットは DC 電流により励磁されるためにパルス毎に強さを変えることができない。そこで異なったビームエネルギーと Twiss parameter を持つ電子と陽電子のそれぞれに対して、ある程度満足のいく共通の磁場値設定（共立オプティクス設定）を用いることが必要になり、KEKB ではセクター 2~5 についてはビームスタディーの結果に基づいてオプティクス設定を決めてビーム運転を行った。このやり方で最も問題が生じたのが陽電子生成標的直前のビーム集束用四極マグネットについてである。これを陽電子生成量に最適化した磁場強度にすると入射用電子ビームは過収束されてビームロスし、逆に電子ビームをうまく通す設定にすると陽電子生成量が 3 割程度減少することがわかり、実際の運転では陽電子生成量を多少犠牲にする設定にせざるを得なかった。SuperKEKB ではこの部分のみはパルス四極マグネットを増設することによってどちらにも最適になる状態を実現する。なお理想的にはライナック全体にわたってパルス四極マグネットを用いることができれば、電子と陽電子のそれぞれに最適化したオプティクスをパルス毎に切り替えることができるが、これを実現するにはコストが高くまた既存スペースに収まるようなマグネット設計は困難であるため他の部分には採用しなかった。

3. 陽電子生成部の改造

SuperKEKB ではこれまでの陽電子ビーム電荷量（バンチあたり）を 1nC からその 4 倍の 4nC（或いはそれ以上）に増強することが必要となる。陽電子は高いエネルギーの電子ビームを金属標的に当てることによって生成する。生成される陽電子の量は一次ビームの電荷量とエネルギーに比例するが、これまで用いている電子ビームの電荷量 10nC をこれ以上増やすと加速管内のウエーク場によるエミッタンス悪化やエネルギー拡がりの増大の影響によりビームロスが大きく安定に加速することが難しくなるし、エネルギーを増やすには加速電界を高くするか或いは加速ユニットを増設して加速領域長を長くすることが必要であるが建設コストの点から現実的ではない。その代わりに我々は標的から出てくる陽電子をソレノイド磁場と加速電界により捕まえるための陽電子捕獲セクションでの収集効率を 4 倍高くする方法を採用する。捕獲セクションでは強いソレノイド磁場とそれに続く弱いソレノイド磁場の組み合わせにより標的から出てきた陽電子の大きな角度拡がりを持った位相空間分布を加速しやすい形に変えるマッチングを行っている。現在は 2 Tesla の磁場を作れるパルスコイルを用いているが、これによるマッチング収束系は磁場分布

が短く単レンズ的でエネルギーアクセプタンスが狭い。これに対して、AMD(adiabatic matching device) と呼ばれるよりピーク磁場が高くしかも緩やかに磁場が変わる色消しレンズ的な収束系に置き換えるとエネルギーアクセプタンスが広帯域になる。これに加えて捕獲セクションで用いる加速管をこれまでより約 1.5 倍大きな開口径を持つものに置き換えることで横方向アクセプタンスが 2 倍大きくなり、結果的に陽電子の量を 4 倍に増やすことができる。なお、捕獲セクションでのソレノイドによる収束系より下流ではビームは四極マグネットにより収束されるが、前の節で述べたようにこの収束系で到達できるアクセプタンスの大きさには制約がある。そこでこのアクセプタンスに見合うエネルギーまでソレノイド収束系にいるうちに加速できるように捕獲セクション内の加速管の数を増やして、四極収束系に受け渡すビームのエネルギーを 80MeV から 120MeV に引き上げることにする。以下の節では、捕獲セクションの各コンポーネントの開発状況を述べる。

3.1 陽電子生成標的

陽電子を生成する金属標的には当初は長さ 14mm のタングステン（輻射長 $4.0 x_0$ ）が用いられていたが、後に単結晶タングステン長さ 10mm に置き換え結晶軸がビーム入射軸に精度良くそろえるように配置することで、チャネリング放射光やコヒーレント制動放射の寄与により陽電子生成量を 25% 向上させることができた^[4]。SuperKEKB ではまずコミッション初期はサポート構造が単純で済む従来型のタングステン標的を用い、後に結晶標的に置き換える予定である。

3.2 フラックスコンセントレータ

AMD 収束系を形成するための強い磁場を作るソレノイドの第一候補としてフラックスコンセントレータ型パルスソレノイドの開発を進めている。これまでロシアの BINP と共同で開発を進め^[5]、昨年 2010 年 10 月から今年 2011 年 3 月までプロトタイプマグネットとプロトタイプパルス電源を用いた磁場分布測定^[5]及び運転試験を行った。この磁場測定の結果、3 次元的な磁場分布と横方向成分の大きさの情報が得られた。その後、通電電流値を徐々に上げながら運転試験を行ったが、磁場強度が 7 Tesla を越えた辺りで大きな放電が起きてそれ以降ガス放出特性が不安定になった。マグネットのどこかの部分が放電により損傷していると思われ、BINP 側と原因調査を進める予定である。また KEK のライナックビームラインに設置して陽電子生成のビーム試験を行うことも予定していたが 2011 年 3 月の東日本大震災によりビームラインが大きく損傷し復旧に時間がかかるため、ビーム試験については当面断念することとした。

フラックスコンセントレータにはこの BINP 型の他に SLAC において使用されてきたものが知られている。BINP 型に比べると最大到達磁場値は低いが長期の運転実績がある。同じ設計に基づくフラックスコンセントレータは中国の IHEP やイタリアの Frascati においても使用されている。KEK においてもこの SLAC 型の設計に基づいた試作、試験を進めていくこととなった。現在、詳細設計について IHEP と情報交換を行っている。

3.3 超伝導ソレノイド

AMD用ソレノイドのもう一つの候補として超伝導ソレノイドについての検討も進めている。これはフラックスコンセントレータと比較して、磁場の軸対称性が非常に良い、理想的なAMD用磁場分布を作れる、電源がコンパクトですむなどのメリットがあるが、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が問題となる。このクエンチ限界値について定量的に調べるために、ライナック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ている。当初はサンプルの小型ソレノイドを用いて試験を行っていたが、実機に近い状況下で試験するために、その内側に照射標的を置けるような形状のプロトタイプソレノイド及びこれに合わせたヘリウム浸け置き型クライオスタットを製作した。超伝導線には厚さ0.6mm、幅0.9mmの平角NbTi線を用いた。ソレノイドは長さ100mm、内直径139mm、外直径185mmの形状で設計中心磁場値は6 Teslaである。これを用いて今年2011年3月にビーム照射試験を行った^[6]。その結果、実際の放射線強度よりは弱い状況下ではあるがビーム照射しても一定時間クエンチが起きないことが確認された。今後このデータに基づいて超伝導ソレノイド実機的设计検討を行いたいと考えている。この検討が進めばSuperKEKB運転のどこかの時点でフラックスコンセントレータに置き換えて陽電子の強度向上に役立てる可能性があると考えている。

3.4 大口径加速管とDCソレノイド

KEKの陽電子捕獲セクションには4本のSバンド加速管(1m長2本と2m長2本)が用いられ、その出口でのビームエネルギーは約80MeVであった。前半の短い加速管と後半の長い加速管には別のRF源が用いられ独立の加速ユニットとなっている。これは標的直後の加速管はソレノイド磁場中にあり電界放出した電子が加速空洞表面を多数回叩くことに加えて、標的からの強い放射線が当たるため放電が起きやすいことへの対策として極力RFパルス長を短くするためである。加速管の開口径は最も狭い箇所直径21mmである。捕獲セクションでのビーム収束は加速管の外周におかれるDCソレノイドの磁場により行われる。現在まで用いられているDCソレノイドは長さ447mm、内直径200mm、外直径590mmの形状で650Aの電流を流す導線を301ターン巻いてある。ソレノイドの内径はSバンド加速管を内側に置くことのできる寸法になっている。これを15台並べて、約8mの領域にわたって平均0.4 Teslaの磁場を形成している。

捕獲セクション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 B_f と、そこに置かれる加速管の開口半径 a に対して $B_f a^2$ に比例するが、後述するようにDCソレノイド磁場の強さを上げるとはサイズ上の制約より難しく、開口径を大きくする方が効果的であり、SuperKEKBではLバンド加速管を採用することとした。周波数は蓄積リングの周波数との整数関係の制約からS-band 2856 MHzの5/11である1298 MHzを用いるが、S-bandとは周波数が互いに素であることがサテライトバンチの抑制に有益であることがわかっている。昨2010年度にディスクロード進行波管、

$2\pi/3$ モード、24加速セルで全長約2mの一号機加速管が完成した^[7]。なおソレノイド磁場中で使用することから放電に対して留意する必要がある、定在波型ではなくRFパルス幅の短くて済む進行波型を採用した。この一号機については今後ハイパワー試験、ビーム照射試験等を進める予定である。この加速管の開口径は最も狭い箇所直径35mmであり、ソレノイド磁場の強さが同じであると仮定すると横方向アクセプタンスがこれまでの2.7倍に広がる。下流の収束系のアクセプタンスとの兼ね合いから捕獲セクションでビームを120MeVまで加速しなければならないが、運転時の平均加速電界は10MV/mであると想定すると6本の加速管を用いることとなる。最終的には同等のLバンド加速管6本を使用する予定であるが、SuperKEKBコミッションの始めはLバンド加速管2本とSバンド加速管4本を用いることとなった。Lバンド加速管はこれまでのSバンドのものより外形寸法が大きく、ここに用いるDCソレノイドの内径も大きく(内直径350mm以上)する必要がある。一方で外形寸法については既存のビームライン直下にあるレーザーアラインメントダクトと干渉しない範囲で最大外直径700mmまでしか大きくできず、現在設計検討を進めているが、これまでと同じ程度の磁場を確保するには電流密度を高くする必要があり消費電力も大きくなると思われる。捕獲セクションの後半にSバンド加速管を用いると既存のDCソレノイドを流用することができ初期建設コストと消費電力に関して有利になる。なお、この部分のSバンド加速管には従来のものより口径の大きなもの(最も狭い箇所直径30mm)を用いることで、横方向アクセプタンスがこれまでに比べると2倍程度の大きさを確保することができると見られる。この大口径Sバンド加速管については設計検討が進んでおり、近いうちに製作を行う予定である。

4. まとめ

SuperKEKBの入射ライナックでは陽電子ビームの低エミッタンスのためダンピングリングを新設するが、これに対応して陽電子生成部の移設及びビームラインレイアウトの変更が必要となる。また陽電子の電荷量をこれまでの4倍にするために6 Tesla級の収束ソレノイドと陽電子捕獲部用の大口径加速管の開発を進めている。収束ソレノイドとしてはフラックスコンセントレータを基本案として検討を進めており、BINP型についてはプロトタイプの運転試験まで進んでいるが放電の問題等もあり、SLAC型についても検討、試作を行っていくこととなった。また将来の陽電子強度のさらなる増強を目指して、超伝導ソレノイドについてもビーム照射試験等の検討を行っている。大口径加速管としてはLバンド加速管の一号機が完成し今後ハイパワー試験等を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 肥後 寿泰, 他, “SuperKEKBのための入射器アップグレード”, 第8回日本加速器学会, つくば, 2011, MOLH02.
- [2] M. Kikuchi *et al.*, “Design of positron damping ring for SuperKEKB”, IPAC 2010, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, TUPEB054, <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>

- [3] N. Iida *et al.*, "Design of the positron transport system for SuperKEKB", IPAC 2010, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, THPD004, <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/thpd004.pdf>
- [4] T. Suwada *et al.*, "First application of a tungsten single-crystal positron source at the KEK B factory", Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 073501 (2007)
- [5] 牛本 信二、他, "フラックスコンцентрレータ用磁場測定システムの開発 (2)", 第 8 回日本加速器学会, つくば, 2011, MOPS051.
- [6] 横山 和枝、他, "陽電子収束用超伝導ソレノイドコイル開発のためのビーム照射実験", 第 8 回日本加速器学会, つくば, 2011, TUPS031.
- [7] 齋藤 一義、他, "陽電子捕獲用 L バンド加速管の製作", 第 8 回日本加速器学会, つくば, 2011, TUPS125.