

## PRESENT STATUS OF KEKB LINAC POSITRON SOURCE

Takuya Kamitani\*, Kazue Yokoyama, Kazuhisa Kakihara, Tsuyoshi Suwada, Kazuro Furukawa, Mitsuo Kikuchi,  
Takashi Sugimura, Mitsuo Ikeda, Satoshi Ohsawa  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

This paper reports on recent improvements and ongoing R & Ds at the KEKB injector linac positron source. It covers present status of following three items. (1) A crystal tungsten was adopted as a converter target to replace an amorphous tungsten target which has been used. An electron-to-positron conversion efficiency was improved 25 % due to contributions from channeling radiation and coherent bremsstrahlung. (2) To realize pulse-to-pulse beam switching of electron/positron injections, we introduced four pulse steering magnets to make a beam orbit bump. Electrons for injection go through a small hole beside the tungsten target. (3) To enlarge positron capture acceptance, R & D of flux-concentrator type of solenoid is ongoing in a collaboration with BINP in Russia.

## KEKB ライナック陽電子源の現状について

### 1. はじめに

KEKB 入射ライナックでは、エネルギー 4.0 GeV、ビーム電荷量 10 nC/bunch、最大バンチ数 2 bunch/pulse、最大ビーム繰り返し 50 Hz の電子ビームを厚み 14 mm (4.0 輻射長) のタングステン標的に照射することにより陽電子を生成している。陽電子は対生成反応の 2 次粒子として生成されることと標的内の多重散乱の影響により大きな角度広がりを持って出てくる。この陽電子をソレノイド磁場により集束するために、最大 2.3 Tesla の磁場を発生させることのできる空心型パルスコイル (有効磁場長 45 mm) が標的直後に設置されている。さらにその下流には陽電子を捕獲するための 0.4 Tesla の DC ソレノイドコイルによる磁場が待ち構えており、約 8 m 長に及び S バンド加速管の領域をカバーしている。なお、ビームアクセプタンスを決定づける開口径は加速管の آپチャーサイズで制限されて直径約 10 mm である。それより下流ではビーム収束は四極マグネットによる長距離収束系に引き継がれ、約 320 m の長さ互る 29 台の加速ユニットにより 3.5 GeV のエネルギーまで加速される。入射する陽電子ビームのエネルギー広がりを小さくするために、ライナック終端部には ECS (Energy Compression System) と呼ばれる装置が設置されている。これは 6 台の偏向電磁石で構成される迂回軌道部 (シケイン) と補正加速ユニットから校正されており、まずシケイン部でバンチを長くして後方ほど高くなるようなエネルギー勾配分布を作ってから、加速電界のサインカーブのゼロ付近でのエネルギーゲインの位置依存性を使ってエネルギー広がりが小さくなるように補正の加減速を行う。ECS によりエネルギー広がりは  $\pm 2\sigma$  の全幅で表して 1.0 % から 0.5 % に半減する。ECS 出口でのビーム電荷量は約 0.8 nC/bunch である。ECS を出たビームは約 440 m 長のビーム伝送ラインを経て KEKB の陽電子蓄積リングに入射される。

この論文ではこの陽電子源において最近なされた或いは現在進行中の 3 つの重要な改良点について述べる。

### 2. 結晶タングステン標的の実用化

2005 年から 2006 年にかけて KEKB ライナックテストビームラインにおいて複数の標的物質 (結晶タングステン、結晶シリコン、ダイヤモンドなど) を用いた一体型標的、及び結晶薄板 + 変換用鉛板とのハイブリッド標的について、その厚み等各種条件を変えた実験データを取った<sup>[1]</sup>。この実験装置には実際のライナック陽電子源とは異なってソレノイド集束系が含まれていないので前方小角度のアクセプタンスしかカバーしていないものの、既存の非晶質タングステンの代わりに結晶タングステンをを用い、かつその結晶軸 (111 軸) を照射する電子ビームの入射方向に 1 mrad 以下の精度で合わせるにより電子陽電子変換効率がこれまでより 25 % 程度向上することを予測する実験結果が得られた。これは結晶軸に沿って電子がらせん軌道をえがくことで発生するチャネリング放射と、結晶内の原子配列の周期性から制動放射の位相がそろうことにより強度が強くなるコヒーレント制動放射の寄与により、ガンマ線発生量が増加する結果、電子から陽電子への変換効率が上昇するためと推定されており、理論的計算結果は実験データを良く再現している。また実験データによれば、4 GeV の電子ビームに対する最適な標的厚みは非晶質タングステンでは 14 mm であったが、結晶タングステンでは 10 mm とかなり短くなる。

この結果に基づいて、結晶タングステンを KEKB ライナックの陽電子源に実際に組み込んでビーム運転に使用することを決定し、結晶の周りのサポート及び冷却構造の設計を行って、製作をスタートした。まず、陽電子 10 mm 長の結晶タングステンの製造をロシアのトムスク工科大学に依頼して輸入した。製造方式上の制約により、得られた直方体形状の標的の端部辺の方向と結晶軸の方向には 10 mrad 程度の誤差がある。まず結晶タングステンと銅サポート及びこれに隣接するステンレスサポートを HIP 加工により接合した。この際タングステン端部では結晶構造が変性するため電界研磨処理により結晶端面から 300  $\mu$ m 程度削除した上で X 線による測定で結晶軸の方向を決定した。これに基づいて銅サ

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

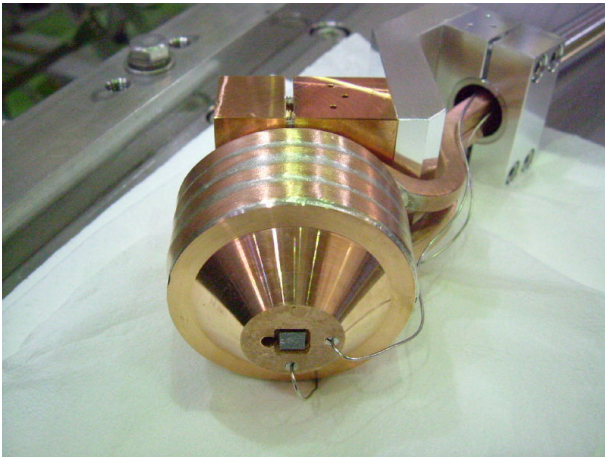


図 1: 結晶タングステン標的

ポートの軸方向が結晶軸の方向を向くように旋盤加工した。さらに標的の駆動部分を真空チェンバーに取り付ける際に、望遠鏡で標的の表面につけた鏡に写る像を観測しながら標的の軸方向が真空チェンバーのビーム軸方向に一致するように調整した上でこれをビームラインに設置した。

ビーム運転開始後にこの標的に電子ビームを照射しての生成陽電子強度と入射電子強度の比から変換効率を求めると  $0.25 \pm 0.01$  であったが、それ以前の非晶質タングステンでは  $0.20 \pm 0.01$  であったことから比較して約 25% の向上が得られたことになる。これはテストビームラインにおいての実験データと良く一致している。その後、約 1 年間の定常運転を経て特にその性能の劣化が認められない。このように実際の加速器運転で使用される陽電子生成標的としては世界初の実用化である。

### 3. パルス毎ビーム切り替えのための標的迂回軌道

現在、リングへの電子と陽電子の入射モードの切り替えは変換標的をビームラインに出し入れすることにより行われており、この時同時に電子銃やバンチング系などの初段入射部のパラメータ、加速位相などの RF 系のパラメータ、収束電磁石の強さなどのビーム輸送系のパラメータなども切り替える。KEKB のルミノシティ調整の都合からいうと蓄積リングのビーム電流値は極力一定であることが望ましいが、KEKB 入射ライナックの構成上、SLAC の PEP-II 入射器のように電子と陽電子を同時に入射できるわけではないので、次善の策としては少なくともパルス毎に電子と陽電子の入射を切り替えることができることが望ましい。これを実現するために最大のネックとなるのは変換標的のビームラインへの出し入れであり、通常これには数秒かかる。また、パルス毎ではなくともなるべく頻りに切り替えをしたいと考えた場合、標的の駆動系には真空ベローズが使用されており出し入れの毎に伸縮するため、ベローズの寿命より切り替え頻度が制約されてしまう。

これを解決する一つの方策が標的のタングステン部分のすぐ横に小さな孔をあけて電子ビームを通す方法で

ある。この場合、入射用の電子ビームは小さな迂回軌道（標的部において 4.5 mm 程度の高さ）で既存のビームダクト及び加速管の中を通過していくこととなるがこれに必要なビーム偏向角は 4 GeV の電子ビームに対して最大で 1 mrad でしかなくパルスマグネットとしてもそれほど大規模なものではない。また 50 Hz のビームパルス毎に切り替えできれば十分なので印可するパルス電流のパルス幅も 20 ms であり、必要となるパルス電源の電圧値もそれほど高くない。パルスマグネットについては経費と準備時間の節減のためトリスタン AR 加速器において使用されていたステアリングマグネットを改造することにした。このマグネットは磁極長 150 mm、磁極間距離 70 mm、最大到達磁場は電流値 6 A の時に 0.0356 Tesla、インダクタンス 32 mH であるが、最大到達磁場強度を約 2 倍にたかくするために、磁極先端部分に鋼板を増設して磁極間距離を 35 mm に短くした。このためコイルのインダクタンスは 64 mH に増加した。これをビームラインに 4 台設置し、ビームダクトも誘導電流の影響を受けないようにセラミックのものに置き換えた。

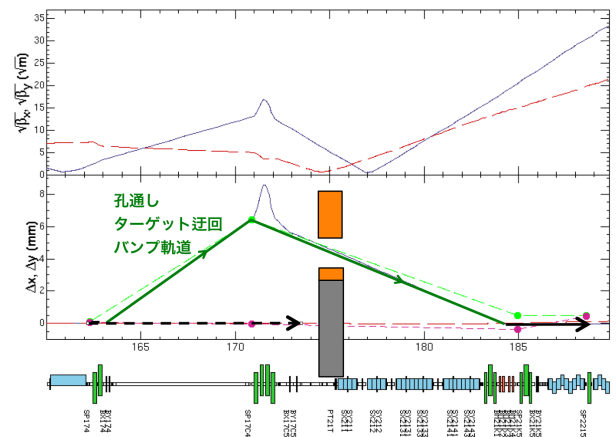


図 2: 標的のバンブ軌道

図 2 にあるように、まず標的の約 10 m 手前にあるステアリングマグネットで水平方向外側に蹴り、標的直前の 2 台目で内側方向に蹴り戻し、それに続く Q マグネット（標的上でビームスポットサイズが小さくなるように絞るためのもの）も内側に蹴ってちょうど標的の横の孔を通るようにする。ビーム軌道は陽電子収束ソレノイドを出たところではほぼ直進ライン上に戻ってくるので、そこにある 3 台目でビームの向きを直進水平方向に曲げる。なお、ビームはソレノイドの入口と出口で垂直方向にもキックを受けるのでソレノイド出口付近に設置した 4 台目の垂直方向のステアリングマグネットでこれを打ち消すようにビームを垂直方向に曲げる。このようにすると、これらパルスマグネットをオフにするとビームは直進して標的に当り、オンにするとバンブ軌道を経て下流に通っていく。

現在、標的の孔にビームを通してバンブ軌道を作るスタディーを進めているが、電子ビームが標的の孔を通る透過率は 90% 程度であり実用上問題無いビームロス量である。そこで次に課題となってくるのは、バンブ軌道よりも下流の部分においては同じ Q マグネットの磁場値

設定で低いエネルギーの陽電子と標的を迂回してきた高エネルギーの電子をとちらも輸送できるようなビームオプティクスを実現することである。これについてはビームスタディーを始めたばかりであるが、電子陽電子ビームともにそれほどロスをせずに通せるような解がありそうである。但し、この下流部でのビーム軌道については共通な DC ステアリングマグネット設定だけでは不十分なのでパルスステアリングを 6 台程度追加することを予定している。これらについては秋からの運転においてさらにスタディーを進める予定である。

#### 4. フラックスコンセントレータ型ソレノイドの開発

現在、陽電子の集束に使用しているパルスコイルの磁場は最大 2.3 T であり、後続する DC ソレノイドの 0.4 T の磁場と合わせて、QWT (Quarter Wave Transformer) と呼ばれる位相空間分布のマッチング装置となっている。

より強いソレノイドを作り出せるデバイスとしてフラックスコンセントレータと呼ばれるものがあり、かつて SLAC の陽電子源においても使用されたものである。その基本的な動作原理を述べる。まず一次コイルの内側に導体を置きそれに円錐状の穴を貫通させる。なお、この導体にはある角度方向のみに狭いスリットを通しておく。こうして一次コイルにパルス電流を流すと導体外周表面に誘導電流が流れるが、これがスリットの部分を通して導体の内周表面をぐるっと回って走る。こうして円錐状の穴の一番狭いところでは小さな半径のところ強い環状電流が流れ、まるで非常に小さいコイルができたような状態になる。磁束としてみると、導体が無い場合にはコイル内側の空間に一樣に通る磁束が、導体があることにより導体より内側のみに集中され(磁場のフラックスがコンセントレートされる)磁束密度が飛躍的に高くなる。なお、磁束密度は奥へ進んで開口径が大きくなるに従って緩やかに下がっていくので QWT よりも広いエネルギーアクセプタンスを持つ AMD (Adiabatic Matching Device) として働く。陽電子標的をフラックスコンセントレータの導体の開口径の一番小さい部分の直前に置くと、生成された陽電子は開口部を通して内部の強い磁場により集束される。

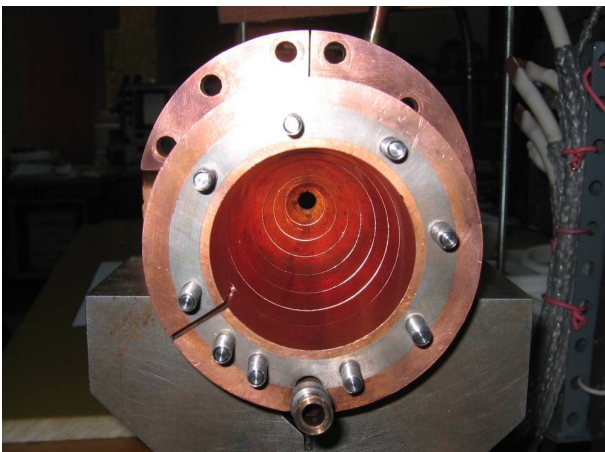


図 3: フラックスコンセントレータ型ソレノイド

ロシアの BINP 研究所では将来のリニアコライダーに向けて新型のフラックスコンセントレータの開発を進めていた。これは既存のものに比べて以下のような 2 つの改良点があった。(1) 導体部分に螺旋状のギャップ部を作りここに一次電流を流すことにより、導体部は一次コイル兼内導体として働く。(2) 導体の外側に円筒状の導体をかぶせることにより、磁束の漏れを減らして中心部分の磁束密度を向上させた。この結果、最大 10 T の磁場を達成できる可能性のあるフラックスコンセントレータの開発が進んでいた。BINP の担当者との議論を重ねた結果、このフラックスコンセントレータを KEKB ライナックの陽電子集束に用いることを想定した R & D を共同で進めることになった。

まずフラックスコンセントレータには原理的な弱点がある。それは中心から外側へ通るスリットのせいで誘導電流分布が軸対称でなくなり、磁場が軸方向成分だけでなくかなり大きな横方向成分を持つことである。このため陽電子には集束磁場として働くだけでなく、横方向成分により運動量キックが与えられるので導体壁面や下流のビームダクトにぶつかってロスするという影響が出る。この影響を減らすために、極力横方向成分が小さくなるように設計をする必要がある。これまでに 3 台製作されたプロトタイプで形状を改良することにより当初に比べて 3 分の 1 程度まで横方向成分を小さくすることができた。

また、実用上の懸念としては、これまでのパルスコイルは冷却水配管部分はすべて真空チェンバーの外側を通過していたのに対して、フラックスコンセントレータでは導体部分と冷却水配管を含めて真空チェンバーの内側に入れる必要があるため、機械的破損などにより水漏れや真空漏れが起きないようにすることに留意しなければならない。これに向けて現在実機相当のプロトタイプで仕様最大電流値での長期運転試験を行って、機械的強度及び長期耐久性に関してデータを取り始めたところである。

#### 5. まとめ

(1) 陽電子生成部において既存の非晶質タングステン標的に替わり結晶標的を運転マシンとしては世界で初めて実用化し、陽電子変換効率を約 25 % 向上させることに成功した。(2) パルス毎の電子/陽電子ビーム切り替えを実現するために、標的横に小さな孔を空けて電子ビームをパルスステアリングマグネットで迂回軌道を通すためのスタディーを進めている。(3) 陽電子の捕獲アクセプタンスを増加させるために、既存のパルスソレノイドコイル(磁場 2.3 T)に代わるべきフラックスコンセントレータ型のパルスソレノイド(磁場 10 T)の開発をロシアの BINP と共同で進めている。現在プロトタイプを製作して試験中である。

#### 参考文献

- [1] 諏訪田剛, "タングステン単結晶標的での陽電子強度の増大に成功", 高エネルギーニュース Volume 25, No 3, October/November/December 2006, Pages 127-136.