

PRESENT STATUS OF POSITRON SOURCE UPGRADE FOR SUPERKEKB

Takuya Kamitani*, Mitsuo Akemoto, Yoshio Arakida, Dai Arakawa, Atsushi Enomoto, Shigeki Fukuda, Kazuro Furukawa, Yasuo Higashi, Toshiyasu Higo, Hiroyuki Honma, Naoko Iida, Mitsuo Ikeda, Eiichi Kadokura, Kazuhisa Kakihara, Hiroaki Katagiri, Miho Kurashina, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Katsuhiko Mikawa, Takako Miura, Fusashi Miyahara, Takashi Mori, Hiromitsu Nakajima, Katsumi Nakao, Takuya Natsui, Satoshi Ohsawa, Yujiro Ogawa, Masanori Satoh, Tetsuo Shidara, Akihiro Shirakawa, Tsuyoshi Suwada, Hiroshi Sugimoto, Toshikazu Takatomi, Tateru Takenaka, Yoshiharu Yano, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida, Lei Zang, Xiangyu Zhou, Daisuke Satoh^(B)

^(A)High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^(B) Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Inst. of Technology

2-12-1 Ohkayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550

Abstract

This paper reports on a recent status of the positron source upgrade for SuperKEKB. Four times higher positron intensity will be achieved by introducing a flux concentrator type of pulsed solenoid and large aperture L-band and S-band accelerating structures in the capture section. Present status of the flux concentrator and the accelerating structures development are described. Beam optical design of the positron linac beam line which is compatible with electron beam with different energy is also shown.

SuperKEKB に向けた陽電子源増強の現状

1. はじめに

SuperKEKB 計画に向けて電子陽電子入射リナックの改造が進められている [1][2]。本論文ではこれに向けた陽電子ビーム増強のための改造の現状について報告する。最上流に位置する加速器である入射リナックは SuperKEKB の蓄積リングの運転開始に先立ってビームコミッションングを行い安定にビーム入射できる状態を確立しておく必要がある。陽電子ビームに関しては、2013 年 12 月からリナック単独でのコミッションングを行い、2014 年秋からは陽電子蓄積リング LER での真空焼き出しを早い時期に始めるためにリナックから LER への直接入射を開始する予定である。本格的な電子陽電子衝突実験を行うためにはエミッタンスを低減させるためのダンピングリング (DR)^[3]を経由して LER への入射を行うことになるが、DR を含めた低エミッタンスビームによる LER コミッションングは 2015 年初旬に行われることが予定されている。これらのコミッションングのそれぞれの時点において要求されるビーム仕様値を順次達成していく必要がある。

SuperKEKB のための陽電子増強の状況については昨年 2011 年 8 月の加速器学会でも報告 [4] が行われているが、その後の要素開発、設計検討の進展も含めた現状について記述していく。

主要な項目としては、陽電子生成標的直後においてビームを強く収束するための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、陽電子捕獲部に用いる大口径加速管の開発及び周波数バンドの選択を含めた設計検討、捕獲部を出た後の DR に至る 1.1GeV まで加速するリナック部分、さらに DR よりリナック終端まで低エミッタンス陽電子ビームを 4.0GeV まで加速するリ

ナック部分でのビームラインレイアウト及びオプティクス検討について述べる。なお、これら陽電子ビームを加速する部分には異なったビームエネルギーを持つ電子ビームも通す必要があるが、陽電子電子の両ビームとも併存できるようなオプティクス設計についても述べる。

2. フラックスコンセントレータの開発

KEKB リナックで陽電子のビーム強度を増強するための 1 つ目の方策は、これまで使用されてきた 2 テスラ級空芯パルスコイルの代わりに 5 テスラ級のフラックスコンセントレータ (FC) 型パルスソレノイドを用いることである。FC は円筒形の銅ブロックに円錐形の穴を開けたものに外側から一次コイルとなるホローコンタクタ線を巻き付けてパルス電流を流し、銅部分の内側に誘起される誘導電流により強い磁場を作るものである。パルスコイルが単レンズ的な狭いエネルギーアクセプタンス (10 ± 2 MeV) しか持たないのに比べて、フラックスコンセントレータでは色消しレンズ的な広いアクセプタンス (1~20 MeV) を持つアディアバティックマッチングデバイス (AMD) であるために陽電子の捕獲効率を倍増させることができる。

昨 2011 年春までロシアの BINP と共同で FC の開発を進めてきたが、プロトタイプの運転試験を KEK にて行ったところ大きな放電により性能劣化が起きるといった問題が生じた。現在 BINP においてこのプロトタイプを分解して放電原因の調査を行っているがすぐに問題解決する目処がまだ立っていない。そこでこれに変わるものとして、長期運転の実績のある SLAC 型の FC を基本設計案として進めることとした。同じ設計に基づく FC を使用した実績のある中国の IHEP とも情報交換しながら開発を進めている。SLAC 型 FC の基本的なパラメータを表 1 に示す。また試作したローパワーモデルの写真

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

を図 1 に示す。

表 1: SLAC 型 FC のパラメータ

導体部長さ	100 mm
導体部直径	26 mm
入口部内直径	7 mm
出口部内直径	52 mm
パルス電流ピーク値	12 kA
ターン数	13
パルス電流時間幅	4 μ s 半正弦波
ピーク磁場値	4.4 Tesla @ 12 kA
(SLAC 運転最大値は)	5.8 Tesla @ 16 kA
インダクタンス	0.8 μ H

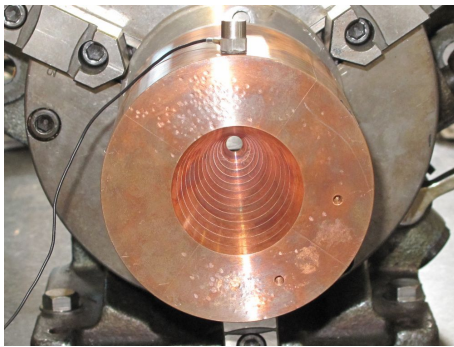


図 1: 試作フラックスコンцентрレータ

図 1 から分かるように SLAC 型 FC では螺旋状にスリットが切っておりバネのような形状をしているが、改良型 FC の可能性を求めてこれとは別にスリットが直線上に平面的に入ったよりシンプルな形状の FC モデルも試作して磁場分布を低電流領域で実測して比較した。この測定結果については今回の学会での Zang 氏の報告^[5]に詳細が記述されているが、結論としては直線スリット型 FC ではピーク磁場は高いが陽電子収集の効率を下げる恐れのある軸対称でない横方向磁場成分も大きいようである。そこで基本設計案としては SLAC 型形状とするが、直線スリット型に大きなメリットがあるようであれば今後そちらを採用する可能性もある。

SLAC 型 FC を製造する際には放電加工機を用いて銅ブロックに 0.2mm という狭いギャップの螺旋状スリットを加工することが重要な過程となる。ギャップがこれより大きいと横方向磁場成分が大きくなってしまうためである。また FC で放電が起きにくくするためには切断面がきれいであることが重要である。この放電加工に関しては KEK の機械工学センターの協力を得て、専用サファイヤプーリーを製作して特殊な放電ワイヤー経路を作り、時間をかけて最適な加工条件を割り出した上で KEK で放電加工を行った。

また銅ブロックにホローコンタクタ線を取り付けるのは銀ロウ付けで行うが、その際 800 $^{\circ}$ C 程度まで温度が上がるために銅が軟化して FC 導体部分の固有振動数がリナック運転周波数の 50 Hz の整数倍に近いところに来ると共振による破壊の恐れがある。IHEP などでは

ハンマリングにより硬化させ固有振動数をシフトさせる手法が取られているが系統的な方法論がない。そこで別の方策として銀ロウ付け温度付近まで高温にしても硬度が変化しない特殊な銅材（三菱伸銅：HRSC 材^[6]）を使用することで硬化過程を省略する可能性についての検討を進めている。通常は無酸素銅と HRSC 材のモデルを製作して、加熱処理前後での振動特性や硬度の測定を進めている。この HRSC 材は通常は無酸素銅に比べて電気伝導が悪い（約 80%）が、前記の報告^[5]によれば、磁場の強さや分布への影響は大きくないことが分かっている。現在、大電流での運転試験を行うために実機相当の試作機を無酸素銅と HRSC 材の両方について製作しており今年 2012 年の秋までに完成する。この運転試験の結果に基づいて FC の材料選択及び最終設計を行い、2013 年秋のビームコミッショニングに向けて長期運転用実機 FC を製作する予定である。

なおこの FC にパルス電流を給電するための電源の開発も進めている。まず今年 2012 年の秋からの試作機 FC の通電試験に向けては、現在 KEKB リナックで使用されているインバータ電源を用いた小型クライストロンモジュレータの PFN 部分の回路を改造することで 4 μ s 幅の半正弦波形でピーク 6kA まで出せるものを準備する。この運転結果を踏まえてフルスペックの 12kA まで出せるパルス電源を製作して実機での運転に備える予定である。

3. 大口径加速管と DC ソレノイド収束系

陽電子のビーム強度を増強するための 2 つ目の方策は、陽電子捕獲部で用いる加速管をこれまで使用しているものより大きな開口径のものに変えることで横方向位相空間アクセプタンスを大きくして陽電子の収集効率を向上させることである。陽電子捕獲部の役割は、まず生成標的から出た大きな角度広がりを持った陽電子を FC の強い磁場により平行光線的なビームに変換し、これに続く DC ソレノイドの収束系で陽電子を捕まえている間に加速管によって後段の Q マグネットによる長距離収束系に引き渡すのに十分なエネルギーまで加速することである。捕獲部の横方向アクセプタンスの大きさは DC ソレノイドの磁場の強さ B_f と加速管の開口半径 a に対して $B_f a^2$ に比例するので、磁場を強くするよりも開口径の大きな加速管を使用することのほうが効果的である。

また、DC ソレノイドの収束系からエネルギーアクセプタンスのより狭い Q マグネット収束系に引き渡す際のビームロスを減らすにはなるべく高いエネルギーで渡すのがよいがコストパフォーマンスの兼ね合いがあるので、捕獲部での加速長は KEKB での 6m（1m 加速管 2 本+2m 加速管 2 本）に対して SuperKEKB では 12m（2m 加速管 6 本）に延ばすことにした。

大口径の加速管としてはこれまでの通常型 S バンド加速管（最小開口半径 $a_{min}=10\text{mm}$ ）に対して、波長が 2 倍程度長い L バンド加速管（ $a_{min}=17.5\text{mm}$ ）を採用することを当初想定したが、建設の初期コストを下げ必要性から大口径型 S バンド（Large Aperture S-band: LAS）加速管（ $a_{min}=15\text{mm}$ ）をコミッショニング初期には採用して、後に必要に応じて L バンド加速管に置き換えることになった。

これまで、SuperKEKB の陽電子捕獲部に用いる目的で L バンドの加速管、導波管、ダミーロード、クライストロンなどの試作及び試験を進めてきた。L バンド加速管の開発については昨年及び今回の学会での報告に詳細が記述されている^{[7][8][9][10]}。また大口径型 S バンド (LAS) 加速管についても製作を進めており、表 2 にこれらの基本的なパラメータを示しておく。

表 2: L バンド及び大口径 S バンド加速管仕様

	L バンド加速管	LAS 加速管
RF 周波数 (MHz)	1298.182	2856.000
タイプ	進行波型	進行波型
セル数	24 + 2	57 + 2
同上: CL 付きの場合	1 + 24 + 5	-
有効加速長 (mm)	2001	2064
ディスク口径 a (mm)	39.4 → 35.0	31.9 → 30.0
群速度 v_g/c (%)	0.61 → 0.39	4.2 → 3.5
shunt imped. r_0 ($M\Omega/m$)	45.7 → 47.6	46.1 → 48.4
充填時間 T_f (μs)	1.360	0.180
減衰定数 τ	0.261	0.118
加速電界 (MV/m)	12.2@15MW	6.93@10MW
同上: SLED 使用時	-	16.42

L バンド加速管を用いるメリットとしてはまず大口径であるため横方向位相空間のアクセプタンスが 2 倍以上大きくなる事が挙げられる。また波長の長いことにより縦方向アクセプタンスも広げることのできるということが一般的には言えるが、我々の場合捕獲部より下流の加速ユニットは全て S バンドであるために最終的な縦方向アクセプタンスはそこで制約されてしまうのであまり縦方向での御利益は無い。しかし当初想定されていなかった別のメリットとして、本来のメインバンチの粒子に対して RF 波長の整数倍下流の位置に形成されるサテライトバンチを削減することができる事が分かった^[11]。これは蓄積リングの RF 周波数 (509 MHz) との関係より、L バンドの周波数として S バンド (2856 MHz) のちょうど半分ではなく (5/11) 倍の 1298 MHz を用いるため RF 波長が倍数関係にないことに起因する効果である。サテライトバンチの粒子数が多いと DR 入射時にビームロスを起こして許容放射線リミットを超える恐れがあるので、これを低減することは重要な課題である。

一方 L バンド加速管を用いるデメリットとしては、外径寸法が大きいことその外側に巻く DC ソレノイドの内径が大きくなってしまい必要な磁場強度を達成するためには消費電力が莫大になるような無理な設計をせざるを得なくなること、また導波管の寸法が大きいことによりジュールに分かれた DC ソレノイド間のギャップ距離が長くなって磁場が低くなる窪みができてしまうことがある。磁場の窪みがあるとそこで陽電子をロスしてしまうので、なるべく窪みを浅くするのが望ましい。

この問題点を克服するために、通常の L バンド加速管の出口カプラーを省略してダミーロードを加速管後部の軸上に付けた形のコリニアロード (CL) 型加速管の開発を行うことにした^{[8][9][10]}。通常の L バンド加速管

ではカプラー部のフランジを含めた構造が収まるようにするには DC ソレノイドの内径を 350mm 以上にしなければならないが、CL 型加速管にするとソレノイドを下流側から挿入すれば加速空洞部の外径寸法に近い寸法まで小さくすることができるので 260mm で済み S バンド加速管の場合の値 (200mm) より少し大きい程度なので、ソレノイドコイルが現実的な設計値で収まる。また導波管を通すための DC ソレノイド間のギャップが加速管の下流端については不要になり磁場の窪みを減らすことができる。L バンド加速管を陽電子捕獲部で使用するには CL 型にすることが必須であると思われる。

なお陽電子捕獲部で使用する加速管は強いソレノイド磁場中に置かれるため、加速構造の表面から電界放出された電子が磁場に捕らわれて放電を起こしやすくなる事が経験上知られているので注意が必要である。例えば、定在波型加速管を用いた場合には RF パルス長が長くなり放電に対して不利になるのでなるべくパルス長が短くて済む進行波型を選んだ。

先に述べたように、ビームコミッションの当初は L-band ではなく大口径型 S バンド (LAS) 加速管を用いる。この場合開口径は L-band の場合よりは小さいが通常の S バンド加速管よりは大きいので、横方向アクセプタンスを広げることができる。また既存の S バンドの RF 源や導波管、ダミーロードなどのコンポーネントを再利用できるというコスト上のメリットがある。さらにビームダイナミクスの観点からは、S バンドの方が電界分布の傾斜が急であるために、減速位相モードで陽電子を捕獲した場合に位相スリップを起こさせて形成されるバンチの長さがより短くなるというメリットがある。これにより捕獲部より下流のビームラインを通したときのビーム透過率を改善できると思われる。

しかし LAS 加速管を用いた場合のデメリットとしてはサテライトバンチになる粒子の割合が多くなるので、これを低減するための方策を検討しているところである。このサテライトバンチの寄与も含めた陽電子捕獲部の特性評価に関しては、加速電界、RF 位相、ソレノイド磁場分布などへのパラメータ依存性について粒子トラッキングシミュレーションを行うことにより設計の最適化検討を進めている。

4. SUPERKEKB 陽電子ビーム収束系

陽電子捕獲部を出た後の Q マグネットによるビーム収束系についても SuperKEKB に向けて以下のようなオプション設計及びビームラインレイアウトの変更が必要となる。

1. 陽電子ビームを低エミッタンス化するための DR をリナック途中のセクター 2 の終端部付近に建設する。これに伴い、陽電子生成標的及び捕獲部はこれまでよりも約 40m 上流側に移動する。これは DR への入射エネルギー 1.1GeV を確保するために必要な措置である。
2. 陽電子捕獲部出口から DR までの約 110m にわたる領域の加速ユニットでは非常に大きいエミッタンス $\gamma\epsilon=6000 \mu m$ (1σ 値) の陽電子を 0.1GeV から 1.1GeV まで加速する。一方同じ領域で上流からやってくる低エミッタンス $\gamma\epsilon=20 \mu m$ (1σ 値) の電子を 3.1GeV から 4.1GeV まで加速する。この領域では

ほとんどのQがDCマグネットであり、陽電子を通すことを重視したビーム光学での磁場設定値のビームラインにエネルギーの異なる電子ビームも通すことが必要となるので、電子に対しては必ずしも最適ではない妥協的な光学となってしまう。

- DRより下流の約240mにわたる領域の加速ユニットでは低エミッタンス $\gamma\epsilon=10\ \mu\text{m}$ (1σ 値) の陽電子を1.1GeVから4.0GeVまで、同じく低エミッタンスの電子を4.1GeVから7.0GeVまで加速する。
- これまでは入射用電子が陽電子生成標的を迂回するためにビームライン中心軸から数mm離れたバンク軌道を通っていたが、SuperKEKBではこれによるエミッタンス増大が問題となる。そこで電子の軌道はビームライン中心軸上を通し、標的及びフラックスコンцентрータを数mmずらした位置に置き陽電子ビームをDCソレノイド系に入るところで中心軸上に戻す。このため、陽電子生成用一次電子ビームは標的手前数mのところ曲げて標的に当てる。

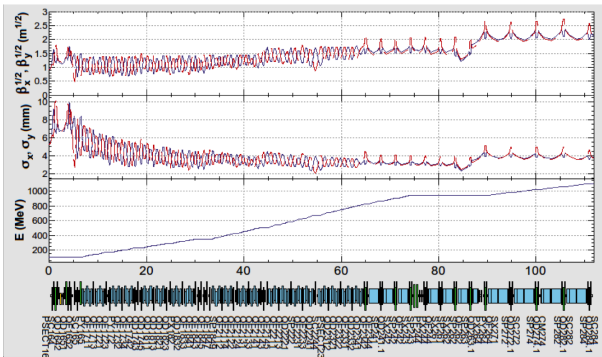


図2: 陽電子光学 (捕獲部からDR-LTR手前)

図2に捕獲部出口からDRへの入射ライン(LTR)手前まで領域についての陽電子ビームの光学を示す。ここではエミッタンスの大きい陽電子ビームを通せるだけの横方向アクセプタンスを確保することが必要であるが、その値はQ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 に比例するので、それに基づいてそれぞれの場所でかかるべき開口径と設置間隔を設定している(表3)。ビームエネルギーが上がるとそれに反比例してエミッタンスの絶対値は小さくなるのでQマグネット設置間隔は長くても済むようになる。ソレノイド収束部を出たビームを下流のFODO収束系の光学とマッチングさせる部分ではビームサイズがいったん大きくなるので大きな開口径のビームダクトを使用している。それに続く5つの加速ユニット(各々約12m長)ではQマグネット設置間隔を短くするために加速管の外側から巻くタイプの大口径のQマグネットを使用しFODO周期系にしている。またユニット1-7, 1-8の部分では捕獲部と同様に大口径のLAS加速管を使用することで必要なアクセプタンスを確保している。

表3のは各部分でのベータトロン位相進み量を示しているが、位相進み量を小さくすると横方向アクセプタ

ンスは小さくなるが許容ビームエネルギー幅は広がるしQマグネットの磁場仕様値も低くて済むので、ビーム透過率をトラッキングで評価しながら透過率を損ねない範囲でできるだけ位相進み量を小さくしている。おそらくこれは低エミッタンスの電子ビームを通す際のエミッタンス増大に関しても良い方向にはたらくと思われる。Qマグネットや加速管のアラインメント誤差に起因するウエーク場による電子ビームのエミッタンス増大の影響については別途、評価を進めている。一方陽電子ビームについては元々エミッタンスが大きいのでウエーク場による影響は無視できる程度である。

表3: DRより上流の陽電子収束系

ユニット名	開口半径	Q周期長	位相進み
陽電子捕獲部	15 mm	ソレノイド収束	-
matching部	30 mm	singlets	-
1-7	15 mm	FODO 1.0 m	75 度
1-8	15 mm	FODO 1.0 m	65 度
2-1	10 mm	FODO 1.0 m	40 度
2-2	10 mm	FODO 1.5 m	50 度
2-3	10 mm	FODO 1.5 m	41 度
2-4, 2-6	10 mm	triplet 2.0 m	70 度
2-7, 2-8	10 mm	triplet 5.0 m	70 度

DRに入射された陽電子ビームは約50msの間周回した後に出射され、リナックの第3セクター部に戻ってくるがこの時にエミッタンスは $10\ \mu\text{m}$ まで小さくなっている。ここからリナック終端までの約240mの間では電子も陽電子も低いエミッタンス($20\ \mu\text{m}$)になっているので、約20m間隔に置かれているQトリプレット13台で十分にビームを通すことができる。図3にDR出口からリナック終端までの陽電子ビームの光学を示す。最初の約80mはDRからの出射ラインでありかなりの大きさのディスパージョンがあるためビームサイズが大きくなっているが、それ以降リナックに入ってから1mm以下の小さなビームサイズで通っていく。位相進みはセル当たり70度である。

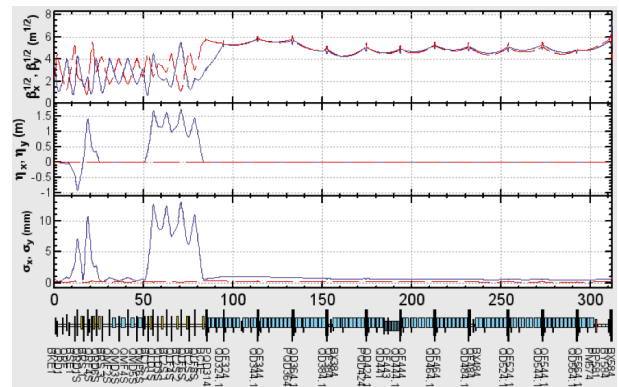


図3: 陽電子光学 (DR出口からリナック終端)

これに対して電子ビームの光学を図に示す。これはリナックの180度周回部(J-arc)を出た後ところを起点としてリナック終端までの領域を含んでいる。オ

プティクス計算起点から約115mのところが陽電子生成標的のある場所である。ここから250m地点までは、基本的には陽電子ビームを通すことを重視したオプティクスでのQマグネット磁場が設定されたビームラインにエネルギーの異なる電子ビームを通してingるためにかなり不規則なオプティクス状態となっている。これは陽電子と電子の切り替えは20msの早いパルス間隔で行われるのに対してQはDCマグネットであるためにそんなに早くは切り替えられないためにそうせざるを得ない。この領域では生成標的の直前など限られた数ヶ所にパルスQマグネットを置いて早い切り替えを行いオプティクスの違いを若干だけ緩和する予定である。なおこの領域においてもステアリングについては20台程度をパルスマグネットにして、少なくとも軌道だけは電子と陽電子で独立に調整できるようにすることを予定している。

これに対してDRからの陽電子ビームが合流する250m地点よりリナック終端までについては、Qやステアリングマグネットの設置スペースに余裕がありそれらの台数も限られるので全数をパルスマグネットに置き換えることにする。こうすることによりこの領域に入った後は電子専用の周期的なオプティクスを実現することができる。また図3に示すようにこの領域では陽電子についても最適のオプティクス設定を行うことができる。これにより各リングの入射路へ向けてのオプティクスマッチングについても個別の調整が可能になる。このために使用するパルスマグネットやパルス電源については設計検討を進めている。

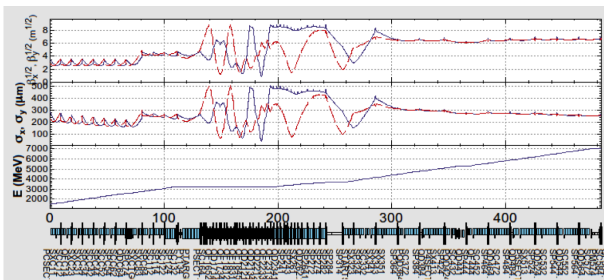


図4: 電子オプティクス (Cセクターからリナック終端)

5. まとめ

SuperKEKBに向けて入射リナックでは陽電子ビーム増強の準備を進めている。生成標的直後の陽電子収束に用いるフラックスコンセントレータはプロトタイプの製作を進めており今年2012年秋より試験を開始する。陽電子捕獲部に用いる大口径加速管についてはコリニアードミーロード付きのLバンド加速管の開発を進めているが、コミッション当初に用いる大口径Sバンド加速管の製作も進めている。これらを用いることにより陽電子ビーム強度を約4倍に増強することを予定している。また陽電子ビームを低エミッタンス化するためにダンピングリングを新たに導入することに伴い、陽電子生成部が移設されるためビームラインレイアウトの変更を行う。必要なアクセプタンスを確保しつつ、エネルギーの異なる電子と陽電子を両方通すためのオプティクス設計検討やパルスマグネットの導入などを進めている。

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9回日本加速器学会, 大阪, 2012, WEUH03.
- [2] 三浦 孝子、他、“KEK 電子陽電子入射器の現状”, 第9回日本加速器学会, 大阪, 2012, THPS002.
- [3] 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>
- [4] 紙谷 琢哉、他、“SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの陽電子ビーム増強”, 第8回日本加速器学会, つくば, 2011, TUPS028.
- [5] Lei Zang、他、“Prototyping of the Flux Concentrator for SuperKEKB Positron Capture”, 第9回日本加速器学会, 大阪, 2012, THPS002.
- [6] <http://www.mitsubishi-shindoh.com/ja/hrs35.htm>
- [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.
- [8] 松本 修二、他、“Lバンド加速管高電力試験”, 第9回日本加速器学会, 大阪, 2012, THPS103.
- [9] 荒木田 是夫、他、“コリニアロードに用いるカンタル溶射膜の特性”, 第9回日本加速器学会, 大阪, 2012, THPS093.
- [10] 宮原 房史、他、“カンタルコリニアロード終端型L-band加速管の設計”, 第9回日本加速器学会, 大阪, 2012, THLR04.
- [11] N. Iida *et al.*, “Beam Dynamics in Positron Injector Systems for Next Generation B Factories”, IPAC 2011, San Sebastian, Spain, September 4-9, 2011, THYA01, <http://epaper.kek.jp/IPAC2011/papers/thya01.pdf>