

UPGRADE OF THE KEK POSITRON GENERATOR

- Present status and the upgrade strategy -

A. Enomoto, K. Kakihara, T. Kamitani, T. Oogoe, S. Ohsawa, M. Yokota, I. Sato and A. Asami
National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba 305

ABSTRACT

Present status of the KEK positron generator and its upgrade design are described: The KEK positron generator has successfully provided positron beams to the TRISTAN colliding ring since 1986 and to the Photon Factory storage-ring since 1988. However, to meet increasing requirements regarding positron beam use, the focusing system of the positron generator will be extensively reconstructed in order to increase both positron acceptance at the target and the following beam-transport acceptance.

KEK陽電子発生装置の増強（現状と増強の基本方針）

1. はじめに

KEK 陽電子発生装置は TRISTAN リングに陽電子ビームを供給するため、1986年定常的な入射運転を開始した。しかし、その後新たに、PF 2.5 GeV 蓄積リングからも陽電子蓄積の要求が出された。PF リングは蓄積する陽電子の個数が多く（TRISTAN-MR の約 3.6 倍）、ビーム仕様も同一でなく、TRISTAN と同じように 2 ns の単バンチビームを入射するのでは時間がかかりすぎる。そこで、PF リングへの入射には、40 ns のビームを用いて入射陽電子の個数を増やし、1988 年より入射を開始した。一方、現在、TRISTAN 計画は、第 2 期の高ルミノシティ実験に移行し、さらに数年後には、第 3 期の B-Physics 実験に入る予定で進んでいる。これらの実験でも、実験効率をあげ、積分ルミノシティを稼ぐため、大幅な陽電子の増強が望まれている。この状況を踏まえ、入射器系では陽電子の増強を重点課題の一つに据えることに決めた。一次電子ビームのエネルギーを上げるための試験の準備も進められているが、同時に、現在の陽電子発生装置の範囲内で、収束系を中心に改造を開始することにした。

以下の報告では、収束系改造の基本方針について述べるが、その前に、ここ数年の間に、国内外で陽電子発生装置の建設や計画があり、KEK 陽電子発生装置について質問されたり、参考や議論の対象になることが多くなったので、その設計思想について改めて要約し、また、現状についても報告しておきたい。

2. KEK 陽電子発生装置の特徴

KEK 陽電子発生装置の建設は TRISTAN 計画の一環として、1982 年度から 3 年計画で進められた。陽電子発生装置の建物は、すでに運転が始まっていた PF 2.5 GeV ライナック（1978-1981 年度建設、1982 年度運転開始）とは独立に、その南西の敷地に平行に建てられた。国際的にも電子/陽電子ライナックが一体になった型（例 CERN）と別々の型（例 DESY）があるが、KEK の場合は陽電子ビームの需要が後で出てきたこと、PF 2.5 GeV ライナックの定常運転への建設の影響を考慮したことなど、により後者の形をとった。即ち、独立した陽電子発生装置で陽電子ビームを作り、250 MeV まで加速した後、2.5 GeV ライナックに輸送し、最終エネルギーの 2.5 GeV に加速している。更に、KEK 陽電子発生装置は、1 MW 級の大電力を使用する世界の陽電子発生装置とはことなり、以下のような独自の構成を採用した。

- 1) 1 次電子ビームを短パルス大電流 ($<2\text{ns}, >10\text{A}$) とした。この 1 次電子ビームで発生する陽電子は、直接 TRISTAN に単バンチ ($2\text{ns} = 1/500\text{MHz}$) として入射できる。また大電流 1 次電子ビームは、ほとんどの 1 次電子エネルギーと変換率により、要求される $>10\text{mA}$ の陽電子を可能にした。
- 2) 収束系のアクセプタンスを適当な値 ($0.15\pi\text{MeV}/c\cdot\text{cm}$) に抑えたため、陽電子収束用ソレノイドが低磁場で短くなり、100 kW 以下の低電力となった。また、ソレノイド後の収束を Qトリプレットの単純

な周期系とすることができ、PF 2.5 GeV ライナックの収束系の改造も最小限にすることができた。

3. 陽電子発生装置運転の現状

TRISTAN 電子/陽電子衝突リングには2時間～2時間半毎に1度の定期入射がある。ライナックのビームは2 ns、25 Hzで、陽電子ピーク電流は15 mA 前後である。蓄積リング（AR、周長381 m）を通じて、主リング（MR、周長3018 m）に約12 mAの衝突電流（電子、陽電子各々、3 mA x 2 bunch）を入射する。1回の定期入射/加速時間は約30～40分である。ライナックは電子、陽電子をそれぞれ4回に分けて入射するが、合計の入射時間は5～7分（内陽電子4～6分）である。

PF 2.5 GeV 蓄積リングへの入射は12時間毎の定時入射（午前9時、午後9時）で、最近24時間毎の定時入射も試みられている。ライナックの陽電子ビームは40 ns、25 Hz、2 mA 前後である。周長187 mのリングに350 mAの電流を蓄積するが、ライナックからの入射蓄積率は0.3～0.6 mA/sである。通常は270 mA 前後からの継ぎ足しなのでライナックの入射時間は5分程度であるが、初期蓄積や地震などのトラブルで0から蓄積する場合でも所要時間は約20分前後である。

ライナックには年間何回かのメンテナンス期間があり、定常運転に入る前には、いわゆる立ち上げ調整が必要である。陽電子ビームの立ち上げは、当然のことながら電子ビームの立ち上げにくらべて手間がかかる。しかし、最近では立ち上げも定式化が進み、1日～2日の立ち上げ日程の後、運転に熟達した業務委託のオペレータにより、ほぼ最高の状態に達するようになった。

ライナックの年間運転時間は4500 h 前後で、最も運転時間の多かった一昨年（88年度）は5100 h を越えた。86年秋 TRISTAN に定常的な入射を開始して以来のトラブルとして、パルスコイルの破損事故が88年5月、11月、89年2月に連続して発生した。このため、コイル及び冷却配管の変更をした。最初のコイル破損事故はこれまでで最も大きな事故で、水漏れ、コイル絶縁破壊、コイル部真空パイプからの真空リーク、標的直後の加速ユニットクライストロンの故障などが重なった。事故後、標的後の、ソレノイド中にある加速管での放電が増え、若干RF電力を下げている。

4. QWT 型陽電子収束系の性質と陽電子の収量

エネルギー E の1個の電子を重い金属標的に当てたとき得られる陽電子の数は、

$$n/E = (d^2n/Ed\Omega dP) \delta\Omega \delta P$$

で与えられる。ここで、 $(d^2n/Ed\Omega dP)$ は入射エネルギーで規格化した前方 ($\theta=0$) の陽電子の生成断面積、 $\delta\Omega$ は立体角、 δP は運動量アクセプタンスである。生成断面積自身を増やすアイデアも検討されているが、通常の重金属標的を用いるとき、陽電子の収量を増やすには、1) 入射電子の個数×入射エネルギー＝標的への入射電力を増やし、2) 収束系のアクセプタンス $\delta\Omega\delta P$ を増やせばよい。ここでは、収束系の性能でできる $\delta\Omega\delta P$ を増やす方法を検討する。

KEK 陽電子発生装置で採用している収束系は QWT (quarter-wave transformer) と呼ばれる方式である。詳しくは別の参考文献を参考にされたいが、これは、標的直後に陽電子を捕獲するために、短く、強い、軸方向に一様な、ソレノイド磁場 B_i (有効長 L) を置き、その後連続して、陽電子のエネルギーがある程度大きくなるまで、加速管上に巻いた、長く、弱い、ソレノイド磁場 B_f で収束する方法である。 B_i は電力を節約するためパルスコイルを用いて発生させている。QWT 型の収束系の性質の見通しをよくするために、磁場パラメータ B_i 、 L 、 B_f と、収束系のアクセプタンス U 、この収束系にマッチングする標的上での陽電子ビームパラメータ（ビーム半径 x 、運動量 P 、横方向運動量 p ）、及び陽電子の収量などとの間の「比例関係」を表の第3欄にまとめよう。これより、QWT 型収束系の性質を以下のように要約することができる。

- (1) 立体角 $\delta\Omega$ を大きくするためには、パルスコイルの長さ L を短くすることが重要である。立体角は L の2乗に反比例する。パルスコイルの磁場強度 B_i (と L の積) は捕獲する陽電子の中心エネルギー P を決める。捕獲する陽電子エネルギーは高いほど速度差や軌道差によるデバンチが少なく、また不規則磁場による偏向にも有利であろう。
- (2) QWT 型の運動量アクセプタンスは $B_f L$ に比例する。パルスコイルを短くすることは立体角を稼ぐが、運動量アクセプタンスを狭くする。 B_f を大きくすることは運動量アクセプタンスを大きくとれること

を意味している。

- (3) 立体角と運動量アクセプタンスを合わせたものは B_f/L に比例することがわかる。即ち、パルスコイルを短くし、パルスコイルの後ろのソレノイド磁場 B_f を強くすると陽電子の収量が増える。
- (4) 立体角が大きくなると、陽電子生成断面積が、だいたい、 $\exp(-\theta/0.35)$, $\theta=p/P$ で減少することがわかっている。従って、直線的に陽電子の収量が増えない点を考慮することが必要である。
- (5) B_f を大きくすると陽電子の軌道差によるデバンチの効果が増えるので、低い運動量の陽電子を集める場合には注意を要する。例えば、SLC のように最小 2 MeV の陽電子を集めるような設計の場合は、標的直後に高電界加速を行なってデバンチが起こらないように対策している。

5. 陽電子増強のためのライナックの改造計画

KEK 陽電子発生装置の増強は、表の第 4～6 欄に示すように、とりあえず 2 つのステップに分けて行なう予定である。まず、パルスコイルは現在のままで、その後のソレノイドの磁場 B_f だけ 2 倍に増やす。この条件では、パルスコイルは同じなので立体角 $\delta\Omega$ は変わらない。また、標的上でのビームの整合条件は、ビームサイズの点では現在よりゆるくなり (0.12 → 0.24 cm)、ビーム調整がより楽になる。一方、運動量アクセプタンス δP が 2 倍になり、陽電子の収量が 2 倍に増えることが期待される。注意しなければならないのは、 B_f が強くなると、軌道差によるデバンチが大きくなる点である。これは、加速利得 (dP/dz) 及び磁場 B_f が一定だとすれば、

$$\delta\phi = (\pi/\lambda) \int (p/P)^2 dz = (\pi/\lambda) (p^2 / (P_0 dP/dz))$$

で与えられる。 B_f 中で輸送可能な最大の横方向運動量はアクセプタンス U と加速器のアーチャー a より求められる：現在は、 $B_f = 0.2$ T, $a = 0.7$ cm, $U = 0.15 \pi \text{ MeV/c.cm}$ で p の最大値は $U/\pi a = 0.2$ MeV/c である。また、 $P_0 = 8.7$ MeV/c, $dP/dz = 10$ MeV/m なので、 $\delta\phi = 0.9^\circ$ である。改造によって、 B_f が 2 倍になると、 U , p も 2 倍になり、 $\delta\phi$ は 4 倍の 3.6° になるが、これはまだ許容の範囲であろう。

次のステップではパルスコイルの改造をすすめる。コイルの長さ L はできるだけ短くしたいが、製作の技術的問題で、いまのところ 50 mm 前後になるであろう。

表 QWT の主要パラメータと改造に伴う変更

パラメータ	記号	比例関係	現在	第 1 ステップ	第 2 ステップ
磁場	B_i		12 kG	----->	20 kG
	L		76 mm	----->	50 mm
	B_f		2 kG	4 kG	4 kG
輸送系アクセプタンス	U	B_f	$0.003 \pi \text{ m.rad}$	$0.006 \pi \text{ m.rad}$	$0.006 \pi \text{ m.rad}$
収束系に整合した 標的上の ビーム	x	B_f / B_i	< 0.12 cm	< 0.24 cm	< 0.14 cm
	P	$B_i L$	8.7 MeV/c	8.7 MeV/c	9.5 MeV/c
	p	B_i	1.25 MeV/c	1.25 MeV/c	2.1 MeV/c
陽電子の相対収量	$\delta\Omega$	L^{-2}	1	1	2.3
	δP	$B_f L$	1	2	1.3
	n	B_f / L	1	2	2.4

6. 今後

陽電子増強工事は夏期および冬期のシャットダウン中に行なう。夏期は 2 か月近い工事期間ができるが、冬期は 2 週間程度で、主として夏期工事で改造を進めなければならない。この夏から第 1 ステップの改造に着手し、冬期工事とあわせて第 1 ステップの改造を完了する予定である。また、第 2 ステップについてもパルスコイルの試作、パルス電源の強化を平行して進めている。

陽電子発生装置の増強後も、その下流の輸送系のアクセプタンスを増やさなければ、2.5 GeV までロスなくビームを加速することはできない。これは次年度以後の課題である。