

A. Enomoto, T. Oogoe, K. Kakahara, I. Sato, A. Asami, and J. Tanaka  
National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

Positron beam was accelerated up to 2.5 GeV and injected into the TRISTAN accumulator ring (AR) in October 1985. Positrons and electrons have been alternately switched and injected into the AR since March 1986. Up to now, maximum 5mA (2ns) positrons were obtained at the end of the 2.5 GeV linac. Problems on acceleration of a high current primary electron beam and on positron focussing are discussed in this paper, and some improvements will be done by the time the TRISTAN main ring (MR) is into commission (October 1986).

1. 序—陽電子ビーム加速の現状

陽電子発生装置は今秋のトリスタン主リング運転開始に向けて最終的な調整を進めている。陽電子発生装置における陽電子ビームの仕様は表1の通り<sup>1)</sup>である。ARには昨年10月に最初の陽電子が蓄積され、3月からは陽電子と電子の衝突実験も開始された。これまでに加速された陽電子ビームはSHBを使用しパルス幅2ns、繰り返し10pps、ピーク電流は2.5GeVリニアックの出口で最高約5mAである。ARリングにはこのうち半分ないし3分の2が入射されている。図1に陽電子発生装置/2.5GeVリニアックにおける陽電子の電流分布の一例を示す。

最近電子銃の「カソード/アノード」間電圧及び「グリッド」パルサー電圧が上がったことにより、陽電子発生装置出口(250MeV)では、20mA以上の陽電子ビームを加速した<sup>2)</sup>。又繰り返しを50ppsにする工事が9月に完了する予定で、ビームトランスポート系のいくつかの改善と合わせて、陽電子ビームの仕様はほぼ満足される見通しである。

	1次電子ビーム	陽電子ビーム
エネルギー	>200MeV	>200MeV
電流	10-20A	10-20mA
パルス幅	<2ns	<2ns
エネルギー幅	<10%	<5%
繰り返し	50pps	50pps
エミッタンス	0.01 $\pi$ MeV/c. cm	0.15 $\pi$ MeV/c. cm
捕獲エネルギー		5-15MeV

表1 陽電子発生装置のビームパラメーター

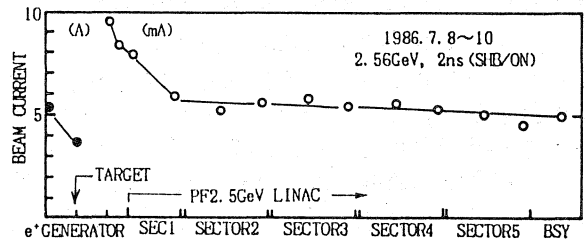


図1 陽電子ビームの電流分布

2. 1次電子ビームのトランスポート

この部分はバンチャーまでのヘルムホルツ型ソレノイドコイルとその後に適当な間隔で配置した四極電磁石トリプレットの集束系である<sup>3)</sup>。図2に示す様に、ソレノイドの部分は、SHBの追加に従って1985年9月に3.5m延長され、6.5mになった。これまでは陽電子生成用標的に当たる1次電子ビームの電流は最大約4Aであった。最近電子銃の電圧を上げることによって6A以上の電流が標的に当たるようになったが、電流の増加にともないビームトランスポートではプリバンチャー付近のソレノイドの磁場が不足し、調整に手間取っていることが指摘されている。

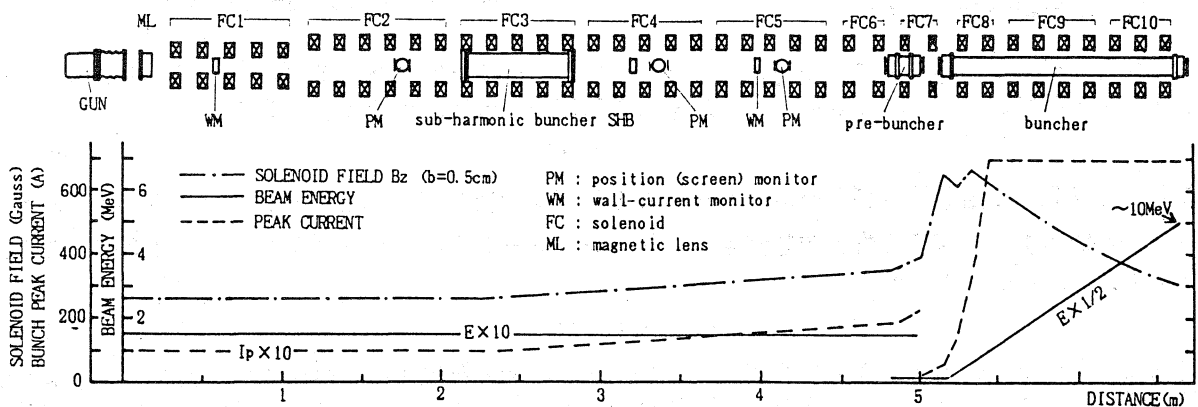


図2 陽電子発生装置—1次電子加速器入射部の集束系

**ソレノイド部の検討** 大電流の1次電子を加速する上で最も重要だと思われるのは電子のエネルギーが低いバンチャーまでの部分である。ここでそのトランスポートを若干検討してみる。図2下段の実線と点線は各々、電子銃の入射電圧が150kV、ピーク電流が10Aの場合について、電子ビームのエネルギー及びバンチのピーク電流の変化を示している。エネルギーの増加はバンチャーまでは殆どなく、バンチャーにはいると概そ直線的に増加する。一方、バンチのピーク電流は、SHBの空隙を過ぎると先ずプリバンチャーにはいるまでに2倍以上に増える。この内プリバンチャーの-55度から140度の位相に入ったものがプリバンチャー／バンチャーによって約5度の幅にバンチされる。即ち先ずプリバンチャーで約55度にバンチされ、バンチャーでは最初の3波長(約30cm)で5度までバンチされる<sup>4)</sup>。従って電流はバンチャー入口で55A、30cm進んだ所で一気に700Aに達する。従って、ソレノイドの磁場はバンチャーの入口付近で最も強い磁場が必要となる。

Brillouin flowに必要なソレノイド磁場はDCビーム電流をI(A)、ビーム半径をb(m)、ビームエネルギーをV(MeV)とすると、

$$B_z = (0.369/b) (I/(\gamma^2 - 1)^{1/2})^{1/2} \quad (\gamma = (0.511 + V)/0.511) \quad (1)$$

である。当初はb=7(mm)として設計したが、ビームのトランスポートが難しいのでb=5(mm)として再検討する。図2の一点鎖線が(1)式で計算した磁場強度を示す。この中でバンチャーの部分ではビームの直径に対してバンチの長さが短くなりDCビームとはみなせないで(1)式をそのまま使用できず、正確にはバンチビームに対する横方向の空間電荷効果を数値計算する必要がある。しかし、ここでは大ざっぱに見積ると、同じピーク電流の場合、バンチされたビームの横方向の空間電荷力はDCビームに比べて1/2程度に減少する。Brillouin flowに必要な磁場は電流の二乗根に比例するのでDCビームに比べ~70%程度である。従って、700Aのバンチビームに対しては~600(Gauss)が必要である。

**改善** バンチャー部のコイルは、8~12mm<sup>2</sup>の平角銅線を巻いたパンケーキ型コイルの間に冷却板を挟んだもので、最大~3A/mm<sup>2</sup>の電流を流すことが可能である。しかし、プリバンチャー部は空間が狭くコイルが薄いので380Gaussと磁場がやや弱い。従って、数10%程度増強することを検討している。

### 3. 陽電子集束系と電子/陽電子変換効率の検討

図3に陽電子発生用標的、パルスコイル、低磁場のソレノイドの磁場分布を示す。パルス磁場は小さなソースサイズと大きな横方向運動量を、より大きなビームサイズと小さな横方向運動量に変換する部分で、quarter-wave transformer(QWT)と呼ばれている。パルス型のQWTはDESY、LEPの陽電子源でも採用されている。表2にパルスコイルと低磁場ソレノイドのパラメーターを示す。

これまでの運転では200MeV、2ns、約4Aの1次電子を標的に当て陽電子発生装置の後ろで約10mA、2.5GeVで5mAを加速している。又最近5.7Aの1次電子で23mAを得ている。これは電子/陽電子の変換効率(比収量)が1GeVの1次電子エネルギーに換算して1.5%~2.0%e<sup>+</sup>/GeV.e<sup>-</sup>であることを示す。

	QWT	低磁場ソレノイド
巻数	16	6528
有効長	76mm	3520mm
自己インダクタンス	~5μH	~1.3H
パルス幅	100μs	DC
最大電流	5000A	120A
最大磁束密度	13.2kG	2.4kG
定格電流	4500A	100A
定格磁束密度	12kG	2.0kG

表2 陽電子集束系のパラメーター

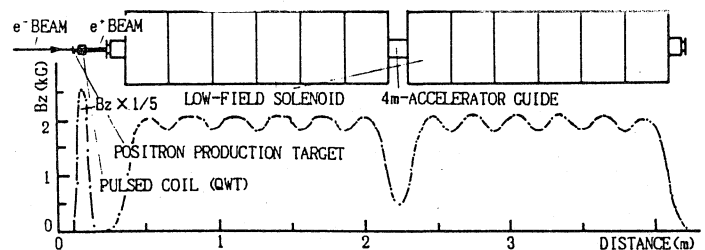


図3 陽電子発生装置-陽電子生成、集束系

**3-1) 入射ビームのサイズ(半径) a<sub>i</sub>** パルスコイルの磁場B<sub>i</sub>、低磁場ソレノイドの磁場B<sub>r</sub>、トランスポート系でのビーム半径a<sub>r</sub>によって最適な入射ビーム半径a<sub>i</sub>が決まる。即ち、

$$a_i = a_r B_r / B_i \quad (2)$$

である。表2の使用条件及びトランスポートでのビーム半径を0.7cmとするとa<sub>i</sub>=0.12(cm)である。

**3-2) 捕獲する陽電子の横方向運動量p<sub>r</sub>** トランスポート系のアクセプタンスpεと標的上でのビーム半径でp<sub>r</sub>が決まる。即ち、

$$p_r = p\varepsilon / \pi a_i \quad (3)$$

である。a<sub>i</sub>が小さいほどp<sub>r</sub>を大きくすることが出来る。即ち捕獲する陽電子の立体角が大きくなり収量が増える。KEKではアクセプタンスが0.15π MeV/c.cmなので(3)式よりp<sub>r</sub>=1.25MeV/c=2.4m<sub>0</sub>cである。以上から解る様に、陽電子発生装置の調整の一つは、1次電子の標的への入射角度や位置の調整と共

にビームサイズを小さく絞ることにある。ビームサイズは現在標的の手前約1mにあるスクリーンモニターで観測しているが、直接標的上のビームを観測し、又スクリーンの画像処理システムにより迅速かつ正確に測定できるように改造する予定である。

3-3) 捕獲できる陽電子の運動量  $pc$  パルスコイルの磁束密度と長さによって決まる。即ち、

$$pc \text{ (MeV)} = B_l \text{ (kGauss)} L_{eff} \text{ (cm)} / 10.5 \quad (4)$$

である。表2の条件では  $pc=8.7 \text{ (MeV)}$  である。又捕獲できる陽電子のエネルギー範囲は QWTによる位相空間の変換を数値計算することによって得られる。これを図4に示す。

3-4) 陽電子生成用標的 タンタルを使用している。直径は20mm、厚さは  $1.5X_0$ 、 $2.0X_0$ 、 $2.5X_0$  ( $X_0$ : 輻射距離) の3種類のものを試したが陽電子の収量は殆ど変わらない。

3-5) 電子/陽電子変換効率の検討(1) 陽電子の収量が SLACのW. R. Nelson、KEKの平山英夫らによってSLCの陽電子強度計算用に開発されたモンテカルロコードEGS4を用いて計算された<sup>5)</sup>。その計算結果の一例を図5に示す。これと図4の比率によって収量を出すと、 $\sim 2 \times 10^{-2} e^+/\text{GeV}^-$  になる。この計算では  $p_r \leq 2m_0c$  の範囲で積分したがこの値は現状の変換効率にかなり近いものである。又、 $1.5X_0$  と  $2.5X_0$  の範囲では標的の厚さに余りよらない点も計算の結果とあっている。

3-6) 電子/陽電子変換効率の検討(2) 表3は世界の陽電子発生装置の比収量を比較したものである。比収量はトランスポート系のアクセプタンス及び捕獲する陽電子のエネルギー範囲による。アクセプタンス(二次元位相空間)についてはその二乗に比例する。このことを考慮すると KEKの陽電子発生率は初期のSLACよりは良く DESY、ORSAYに近い。

3-7) 改善 陽電子生成用標的でのビームサイズの観測の外に、標的とパルスコイルの位置関係、パルスコイルと低磁場ソレノイドの間の隙間の問題を見直している。又、陽電子発生装置を出た後のトランスポートでの不要なビームロスをなくするために改善を行っていく予定である。

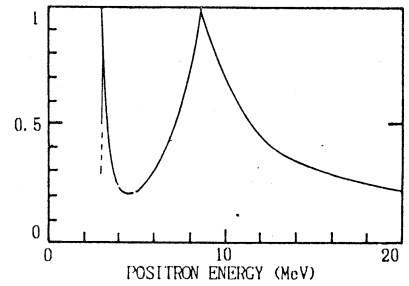


図4 QWTの運動量アクセプタンス(比)

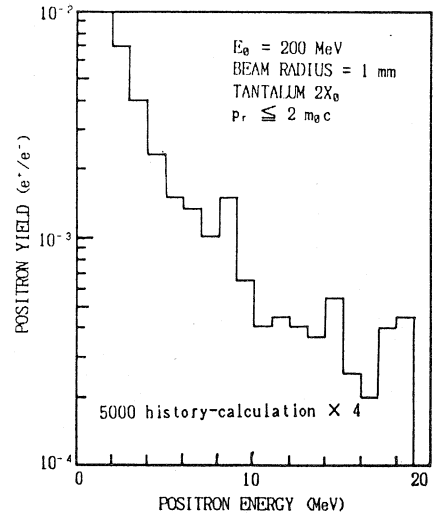


図5 モンテカルロ計算による陽電子の収量

研究所名	SLAC	DESY	ORSAY	KEK
集束系の形式 低磁場ソレノイド	TS (18.2-2kG) 2.4kG×7m	QWT (18kG) 4kG×10m	TS (12.5-1.8kG) 1.8kG×30m	QWT (12.5kG) 2kG×3.5m
アクセプタンス(π・MeV/c・cm)	0.15	(0.30)	0.17	0.15
入射電子エネルギー(GeV)	5~6	0.20	0.9~1.0	0.2
入射電流(A)		0.21	0.8~1	4~6
捕獲エネルギー範囲(MeV)	5~15	8.5~11.5	5~22	7~11
比収量 (e+/GeV・e-) (陽電子のエネルギー)	at 0.5% (500MeV) 0.15% (20GeV)	4.8% (400MeV) 2.9% (dE/E1%, 400MeV)	3.3% (300MeV) 1.3% (dE/E1%, 1.2GeV)	2.0% (250MeV) 0.6% (2.5GeV) 0.4% (dE/E0.5%, 2.5GeV)
年(文献)	1967(6)	1973(7)	1983(8)	1986

表3 陽電子発生効率(比収量)の比較。比収量は入射電子エネルギー1GeV当りに規格化した。

### 参考文献

- 1) I. Sato et al., Proc. of the 8th Meeting on Linear Accelerators (1983) 32
- 2) S. Ohsawa et al., Proc. of the 11th Meeting on Linear Accelerators
- 3) A. Enomoto and I. Sato, Proc. of the 8th Meeting on Linear Accelerators (1983) 38
- 4) A. Asami et al., Proc. of the 5th Symp. Acc. Sci. and Tech., KEK (1984) 77
- 5) W. R. Nelson, H. Hirayama, and D. W. O. Rogers, Stanford Linear Accelerator Report SLAC-265 (December 1985)
- 6) R. B. Neal edit., The STANFORD TWO-MILE ACCELERATOR, New York, Benjamin, (1968) 581
- 7) G. Stange, Interner Bericht DESY S1-73/4 August 1973
- 8) R. Chehab et al., LAL/RT/83-03 March 1983