

SUMMARY OF PF INJECTOR OPERATION FOR TRISTAN

I.Sato

Lational Laboratory for High Energy Physics  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

ABSTRACT

Regular experiments in the main ring of TRISTAN had been started to researches into elementary particle physics in May of 1987, and have been closed owing to execution of next project in May of 1995. To increase integral luminosity in the main ring, the PF injector linac had performed improvements of klystron, upgrades of positron generator and reconstructions of injector part with electron-gun. In result, quality of operation had been improved in progression. The paper reports summaries of progressive improvements in the PF injector linac operation.

トリスタン実験のためのPF入射器運転の総括

1. はじめに

PF入射器は放射光2.5 GeV光源リングに電子ビームを直接入射する目的で1978年4月に着工し、1982年1月に完成した。同年2月に試運転を行い、2.2 GeVに成功すると、直ちに光源リングへ電子ビーム入射を開始した。同年3月、2.5 GeV、50 mAに加速に成功し、同年6月、放射光共同利用実験を開始した。入射器では、引き続き入射器の性能テストを行い、同年7月、世界最強の320 mA加速に成功した。

1982年4月、トリスタン建設費が認められると、同年11月、陽電子リニアック棟建設に着工、1984年7月に完成した。直ちに、陽電子ビームの加速テストを開始し、同年10月には入射蓄積リング (AR) に電子と陽電子のビームを入射した。入射器では、その後、クライストロンの改良を重ね、電子銃を含む入射部を増強し、PF入射器の故障率は飛躍的に小さくなった。陽電子リニアックの入射部や陽電子源も増強し、1992年6月、陽電子リニアックの終端で、陽電子ビーム強度は約50 mAに達した。

一方、トリスタン主リングで行われた高エネルギー物理実験では、弱い相互作用と電磁相互作用との間の干渉効果を確立、エネルギーが増大するとクォークを結合するグルオン (膠子) の結合力が弱くなる性質、グルオンとグルオンの間に結合作用があること等、素粒子の基本的な性質を明らかにした。PF入射器では、1995年5月末まで、電子・陽電子ビームをトリスタン入射蓄積リングへ安定に供給し、これらの実験効率を上げるために強力な支援をした。

2 PF入射器建設の意義

わが国ではそれまでに、東北大学の300 Me

V電子線形加速器の建設経験はあったが、GeV級の大型線形加速器建設はPF入射器が最初であった。建設経緯から、PF入射器の予算は、2.5 GeVの電子シンクロトロン建設に近い価格の37.5億円に縮小され、その上、人員が不足し建設期間も短縮された。そこで、建設コストの削減、建設時間の短縮、作業の効率化等を試み、加速装置のユニット化を積極的に促進すると同時に、制御を単純化するための加速器装置のグループ化も積極的に試みた。一方、建設を進めながら大電力高周波技術、位相安定性、加速管の超精密加工技術、加速管の量産技術、アライメント方法を確立した。このように、PF入射器の建設は、放射光科学や素粒子物理学の発展を側面からサポートするだけでなく、欧米に遅れ取っていた我が国の大型線形加速器技術を飛躍的に発展させる役割を大いに果たしたといえる。

3. トリスタン入射蓄積リングへの入射

トリスタン衝突リング (主リング) では電子・陽電子の衝突頻度 (ルミノシティ) を大きくするために、電子ビームと陽電子ビームをそれぞれ10 mA ( $6 \times 10^{11}$ 個) 蓄積する予定で建設計画が進められた。しかし、2.5 GeVの電子・陽電子ビームを主リングに直接入射しても、主リングの減衰時間が長いので、入射蓄積に長時間を要するので、入射器と主リングの中間に入射蓄積リング (AR) を設けることになった。ARリングが1分以内で入射を終了するためには、ビームパルス幅は2 ns以下で  $5 \times 10^7$  個/パルスの陽電子源が必要となった。この性能を確保するように陽電子線形加速器の設計は進められた。

4. 入射器運転

建設が1982年1月末に終了し、同年2月、電子ビーム加速テストを行い、20mA電子ビームの2.2GeV加速に成功した。直ちに、PFリング入射を開始し、1982年3月、50mA電子ビームの2.5GeV加速にも成功した。又、共同利用実験の合間を縫って、入射器の性能テスト実験を行い、1982年7月、パルス幅1.6μsの320mA電子ビームの1.6GeV加速に成功した。

一方、入射器からPFリングやトリスタンの入射蓄積リングに数10mAの長パルスビームを入射しても、リングのビーム損失が増加するだけであった。このため、電子ビームの増強は後回しになり、陽電子ビームの増強やビーム・エネルギーの安定性が当面の改良の対象となった。特に、クライストロンは印加する電圧が1%変化すると出力高周波電力の位相が約8%変動するので、クライストロンパルサーの電圧安定度確保には、細心の注意を払い調整した結果、電圧変化を0.2%以下に押さえることができ、入射器のエネルギー安定度は改善された。

クライストロンの放電対策を強力に押し進めた結果、その動作特性が安定し、入射器の稼働率は飛躍的に改善された。

PF入射器の完成当初は、PFリングでは電子ビームを蓄積して放射光共同利用実験を行っていた。PFリングの真空度も良くなり、蓄積ビームの寿命が延びると、蓄積ビームが突然急激に減少

する特異な現象が観測されるようになった。この現象は電子ビームによるイオントラップが原因ではないかと考えられた。そこで、PFリングでは電子から陽電子に蓄積ビームを切り替えた結果、特異な現象は消滅した。

表1には、1982年から1995年までの入射器の運転時間、稼働率、ビーム強度とリングの蓄積率を示す。

### 5. クライストロンの改良

入射器の稼働率には、加速器の色々な装置が関連しているが、クライストロンの改良なしには、稼働率の改善は進展しない。ここでは、特にクライストロンの改良のみを取り上げて、その経緯を述べることにする。

PF入射器では高周波電力の平均出力21MW以上のクライストロンを41本使用している。21MWを安定に出力するには、最大定格が約30MWのクライストロンを必要とするが、しかし、建設開始当初の日本には、上記の性能を有する商用クライストロンがなかった。

当時、SLACでは、38MWクライストロン(XK5)を開発中であった。そこで、このクライストロンの設計をベースに30MW級クライストロンを日本で開発することになった。

このクライストロンの性能仕様はパービアンズ2.1μA/V<sup>3/2</sup>、定格電圧270KV、最大出力30MW、電力利得51dB、効率40%と定

表1 入射器の運転時間、稼働率、ビーム強度とリングの蓄積率  
( ) : 最大電流値を示す

| 年度   | 運転時間<br>hr | 稼働率<br>% | 電子ビーム mA    |                   |               | 陽電子ビーム mA            |                   |              |                   |
|------|------------|----------|-------------|-------------------|---------------|----------------------|-------------------|--------------|-------------------|
|      |            |          | 短パルス<br>2ns | 蓄積率<br>AR<br>mA/s | 長パルス<br>1.0μs | 短パルス<br>2ns<br>*15ns | 蓄積率<br>AR<br>mA/s | 長パルス<br>40ns | 蓄積率<br>PF<br>mA/s |
| 1982 | 1,600      |          |             |                   | 55 (57)       |                      |                   |              |                   |
| 1983 | 2,100      |          | 100         |                   | 50 (400)      |                      |                   |              |                   |
| 1984 | 2,584      |          | 120         |                   | 30-50         | *2.8                 |                   |              |                   |
| 1985 | 2,920      |          | -           |                   | 50            | *4.5                 | 0.01              |              |                   |
| 1986 | 4,391      |          | 99          | 2.0               | 50            | 9                    | 0.16              |              |                   |
| 1987 | 4,016      | 95.5     | 154         | 5.0               | 50            | 13                   | 0.29              |              |                   |
| 1988 | 5,108      | 95.4     | 174         | 1.5               | 50            | 15                   | 0.28              | 2.0          | 0.30              |
| 1989 | 4,542      | 98.7     | 81          | 1.2               | 50            | 17                   | 0.22              | 1.8          | 0.30              |
| 1990 | 5,303      | 98.3     | 84          | 1.4               | 50            | 16                   | 0.26              | 2.0          | 0.30              |
| 1991 | 5,234      | 97.5     | 136         | 1.9               | 50            | 16                   | 0.22              | 3.4          | 0.30              |
| 1992 | 5,116      | 98.6     | 142         | 2.4               | 50            | 28                   | 0.40              | 5.2          | 0.60              |
| 1993 | 5,409      | 98.9     | 122         | 1.7               | 50            | 26                   | 0.44              | 6.4          | 0.65              |
| 1994 | 5,043      | 99.2     | 167         | 2.3               | 50            | 20                   | 0.33              | 5.6          | 0.80              |
| 1995 |            |          | 334         | 2.9               | 50            | 25                   | 0.31              | 4.5          | 0.45              |

めて、三菱電機に製造を依頼した。このクライストロンは省エネルギーのためにビーム集束を永久磁石で行うことになった。1979年、最初の大電力クライストロン（PV3030）5本が納入された。1982年には、クライストロン全数が納入され、平均電力出力が25MW、平均利得が48dBであった。

クライストロンの重故障はアーク放電による陰極絶縁碍子の破損や、セラミック窓のピンホールによる真空リークであった。コロナリングの構造を改良し、放電を防止した。1982年、陽電子リニアックではクライストロンのビーム集束に電磁石を使った。このクライストロンでは、260KVの陰極電圧で30MWの出力を得ることに成功した。クライストロン出力が大きくなると出力窓のセラミック破損が多くなった。そこで、1986年、レゾナントリングを製作し、この装置を使って耐性テストを精力的に行い、セラミックの破壊メカニズムを解明した。又、セラミック材の改良に着手し、セラミック窓のピンホール破壊は窒化チタン膜をセラミックの表面にコーティングすることによって減少した。

クライストロンの最大問題点は、運転中に頻繁に管内放電することであった。又、クライストロンの寿命が大きくばらつくことも問題になった。

入射器の運転中、クライストロンに放電現象が発生すると、その都度、運転を停止する。このために、入射器の稼働率が下がった。そこで、故障したクライストロンを分解した結果、放電場所は陰

極と陽極間であった。これはクライストロンを活性化するとき、陰極の酸化バリウムが大量に飛散し陽極に付着して、陰極と陽極の間の絶縁耐圧を低下させたことが原因であった。又、これは、クライストロン寿命を大きくばらつかせる原因となった。そこで、酸化物塗布型陰極（O）から酸化物含浸型陰極（BI）に変更した。この結果、陰極を活性化する時の飛散量を大幅に減少させ、クライストロンの放電を大幅に減少させることに成功した。

1987年、大多数のクライストロンに上記の改良が加わり、平均出力電力も増大した。一方、故障して使用不能クライストロンの平均寿命も4400時間を越え、又使用中のクライストロンの平均運転時間数は9600時間になった。こうなると、入射器の加速エネルギーに余裕ができ、加速ユニット数台を待機させられようになった。クライストロンの動作が不良状態になると、直ぐに、この加速ユニットを待機状態にして、待機している加速ユニットを運転状態に切り替えている。この対応によって、運転は素早く再開できる。又、この処置により、入射器の稼働率は飛躍的に向上した。1993年、故障クライストロンの平均寿命が10,758時間に達し、使用中クライストロンの平均運転時間数は15,262時間となった。クライストロンの改良による稼働状態の変化を表2. に示す。

表2 年度別クライストロンの稼働状態

| 年度   | クライストロン<br>使用<br>総数 | 年度<br>別<br>生産<br>本数 | 陰極<br>種類 | 補用<br>品<br>本数 | 使用不能 クライストロン |             | 使用可能 クライストロン |             | クライストロン<br>積算運転<br>時間 |
|------|---------------------|---------------------|----------|---------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-----------------------|
|      |                     |                     |          |               | 使用<br>本数     | 平均寿命<br>時間数 | 使用<br>本数     | 平均使用<br>時間数 |                       |
| 1982 | 53                  | 9                   | 0        | 0             | 11           | 1,300       | 42           | 2,900       | 505,825               |
| 1983 | 63                  | 13                  | 0        | 3             | 20           | 2,300       | 43           | 4,200       | 588,374               |
| 1984 | 70                  | 13                  | 0        | 9             | 25           | 3,100       | 45           | 5,800       | 827,579               |
| 1985 | 79                  | 12                  | 0        | 2             | 28           | 3,600       | 49           | 6,200       | 946,980               |
| 1986 | 91                  | 15                  | 0        | 3             | 47           | 4,400       | 49           | 7,400       | 1,094,474             |
| 1987 | 106                 | 14                  | 0+BI     | 2             | 52           | 4,400       | 50           | 9,600       | 1,155,384             |
| 1988 | 120                 | 20                  | BI       | 2             | 67           | 4,500       | 51           | 11,400      | 1,401,450             |
| 1989 | 140                 | 18                  | BI       | 5             | 82           | 6,400       | 53           | 12,400      | 1,852,515             |
| 1990 | 158                 | 18                  | BI       | 6             | 98           | 8,500       | 54           | 11,200      | 2,209,783             |
| 1991 | 176                 | 15                  | BI       | 14            | 107          | 10,100      | 55           | 11,100      | 2,411,505             |
| 1992 | 191                 | 12                  | BI       | 14            | 112          | 10,700      | 55           | 11,600      | 2,485,947             |
| 1993 | 203                 | 14                  | BI       | 26            | 121          | 10,800      | 56           | 13,900      | 2,581,535             |
| 1994 | 213                 | 13                  | BI       | 27            | 129          | 10,900      | 57           | 16,200      | 2,590,590             |
| 1995 | (230)               | (17)                | BI       | (34)          | 138          | (11,200)    | (58)         | (18,000)    |                       |