

# PHOTON FACTORY 2.5 GeV ELECTRON LINAC

Jiro Tanaka

National Laboratory for High Energy Physics

## ABSTRACT

The Photon Factory 2.5 GeV electron linac was almost completed in January 1982, and the test operation was started at the end of the month.

Full 2.5 GeV, 55 mA beam was successfully accelerated and a maximum current of 300 mA (2.5  $\mu$ s) was obtained at 1.81 GeV. The current is a B.B.U. threshold for the present operational condition. An initial performance of the linac and a few of the technical problems experienced during the test operation are described.

## 1. 序

放射光実験施設 (PF) の 2.5 GeV electron linac が、1981年7月、セクター部 (500 MeV) の試運転に成功した事は、昨年の研究会で報告した通りである。8月以後は、56年度内完成を目標に、総合組立てを急いできた。1982年1月中旬には、略、組立てを終了し、同月末からビームテストを開始した。2月10日には、2.34 GeV で 57 mA を加速、3月16日には、2.54 GeV で 55 mA を加速することができた。又、大電流テストでは、1.81 GeV で 300 mA (2.5  $\mu$ s) を得て、基本的な所期の目標を達成し、3月19日、56年度の試運転を終了した。この間、Storage ring も組立てを終了、2月11日からビームの入射を開始した。3月9日に始めて 1.57 GeV で 5 mA のビームが蓄積され、3月11日には、2.5 GeV で 6 mA のビーム蓄積に成功した。その後、1.68 GeV では 100 mA を超える蓄積ビームが得られ、入射ビームの1パルス当り 20 mA の電流増加量を記録した。この試運転の最後には、放射光を使った予備実験も行われた。

3月20日から5月末までは、測定実験室拡張工事のため休止し、6月、7月に、7週間にわたる運転が行われた。この期間には、加速器の調整及び研究のほか、測定器の調整を兼ねた放射光利用実験が行われた。この期間中に、Storage ring 内の真空は徐々に良くなって、80 mA のビームの life-time が40分まで延び、放射光強度も充分強くなって、利用実験では、既に多くの成果があげられている。

7月下旬から10月中旬までは、「TRISTAN」へのビームチャンネル用トンネル工事のため休止し、現在、10月下旬からの運転再開を目指して整備が行われている。

## 2. 運転状況

基本的な総合性能として、ビーム電流値とエネルギーの関係は、全 rf power をパラメーターとして

示すと、Fig. 1 のようになる。

略、設計通り、840 MWで50 mAのビームを加速した時、2.5 GeVを若干上回るエネルギーが得られている。通常の運転では、ビームのパルス中は0.8~1.5  $\mu$ sである。全長400 mに及ぶ加速管の内部(最小孔径約1.8 mm)を通過するビームの透過率は、いくつかのQ電磁石の配線ミスがあった初期を除き次第に改善されてきた。

今では、オーセクターに入射されたビームは、殆んどこぼれることなく、略、100%が最後の加速管まで通過している。これは、集束系の計算機による集中制御が可能となり、且、各種ビームモニターが有効に働き始めたためである。各加速ユニットに取付けられた合計40個のloss monitorは、感度も高く、ビームの当たっている位置が明瞭に表示されるので、集束系の調整に便利である。

入射部は、当初、電子銃から大きな電流を取出して、僅かなビーム電流を加速する様な状況であったが、調整が進むにつれて改善され、電子銃を出力したビーム電流の約70%が最終まで加速されるようになった。300 mA近くのビーム電流でもこの比は余り変わらず、Pre bouncer, Buncherで予想されるCapture efficiencyに一致している。

通常の運転では、約50 mAが加速されており、ビームスイッチャードの偏向電磁石、集束系等を含む全長約150 mのビームトランスポートラインを経て、Storage ringに入射される電流値は約20 mAである。

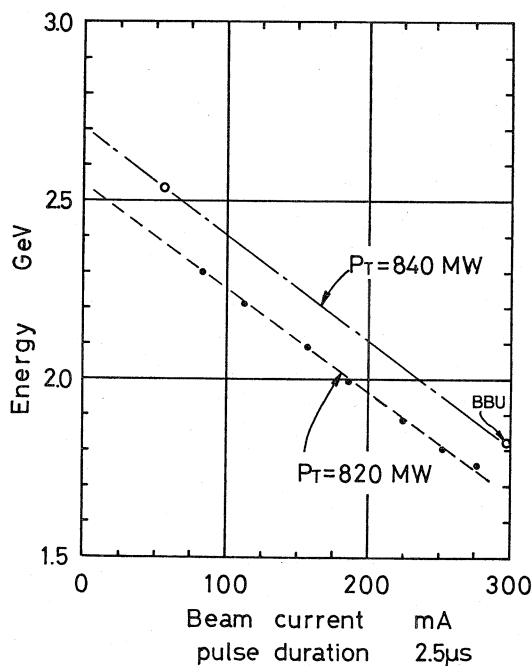
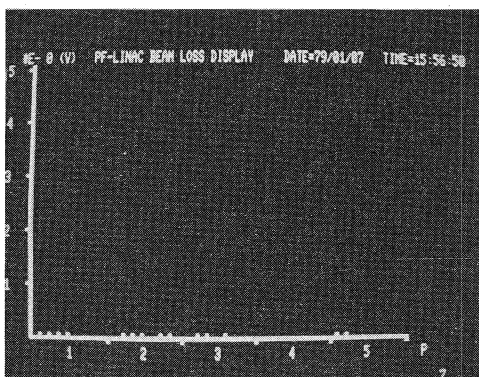
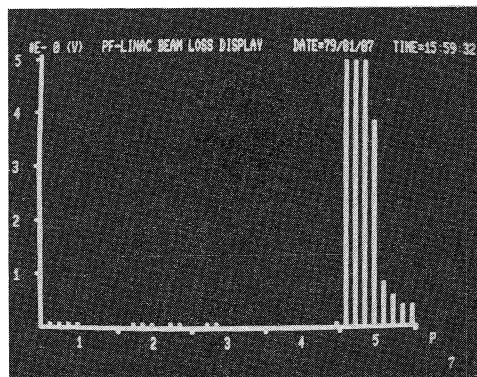


Fig. 7. ビーム電流とエネルギー



(a)



(b)

Fig. 2. ビームロスモニターの表示。(b)はオセクター出口にプロファイルモニターを挿入した場合。

beam bunch と rf 位相との関係は、ビームエネルギー、エネルギーの安定性、bunch の形状等に影響を及ぼるので重要な問題である。運転開始直後は、Klystron まわりか、各セクターコントロール室で、beam loading による rf 波形の変化をみながら、Klystron rf 入力側の位相を調整していた。6月以降は、中央コントロール室から、4/台の Klystron 夫々について、位相調整が遠隔操作で行えるようになった。この方法による位相調整の誤差は、当初  $10^\circ$  程度あったが、rf の波形表示を Transient digitizer に変えてからは、調整がやり易くなり、位相誤差も多少改善された。7月以降からは、試作の Phase detector が一台出来上がったので、そのテストを兼ね、再調整を行った。これによれば、位相誤差は  $\pm 2^\circ$  以内に入る模様である。これはいつか自動化される予定のものである。

これまでの放射光の総合運転では、Storage ring のエネルギーは、 $1.4 \text{ GeV} \sim 2.5 \text{ GeV}$  の間の任意のものがえられしてきた。入射エネルギーをこれに合わせるためには、運転操作の便宜上、Klystron の電圧や rf 入力を一定に保ち、Linac 終端部の Klystron から順次停止若しくは、トリガーパルスのタイミングを正常の位置から外した Standby mode に切替える方法をとってきた。例えば、 $1.6 \text{ GeV}$  の運転では、No. 4, No. 5 セクターの Klystron 1/3 台を停止若しくは Standby mode に切替えるわけである。ビームは、加速電波のない多数の加速管を通過するわけであるが、これまでのところ、 $1.5 \text{ GeV}$  以上のエネルギーでは、著しい影響はみられなかった。

入射器は、他の場合と異なり、常に入射ビームのエネルギー及びエネルギー中、ビーム断面形状等の安定なことが要求される。PF では、ある入射エネルギーが設定されると、加速 mode にある Klystron からの rf の位相は beam bunch に対して正しい位相角に調整し、最後部の Klystron だけその位相を変化させて、トリガーとするのがエネルギー調整に一番簡便な方法となっている。

大電流加速テストでは、集束条件は通常運転とは多少異なるが、全 rf 出力  $840 \text{ MW}$ 、ビームパルス中  $2.5 \mu\text{s}$  で  $300 \text{ mA}$  ( $1.8 / \text{GeV}$ ) を得た。この時の rf 及び集束の条件では、上記の電流値が、B.B.U. の threshold であった。調整次第では、この threshold は多少増大するものと思われる。2 GeV 級の Electron linac で、高い B.B.U. threshold が得られたのは、加速管を5種類に分けたこと、rf field の対称性を特に配慮したこと及びビームの対称性を良くするため、集束系にトリプレット Q 電磁石を採用したことが効いたものと考えている。

Linac では、電子銃からのビーム電流値が一定している限り、加速電波の性質如何によって、ビームの良否が決まられると云っても良いであろう。勿論、集束用電磁石類の電流値も影響するが、これらは直流であり且つ、電圧、電流を安定させることは困難ではない。

PF Linac に於ては、rf は入射器として充分使用できる程度には、出力、位相共に安定化されている。現在一番の難兵は、Klystron 内部の arcing で、Klystron 4/台各々が平均17時間毎に一回の割合で arcing を発生している。全体からみれば、これは約20分に1回 arcing のため Klystron の電圧を Off にせざるを得ない状況である。つまり、20分に1回の割合でビームエネルギーが約2.5% 値下し、Storage ring への入射に影響されることである。幸に、Storage ring への入射時間は、入射の条件が整っていれば数分以内ですむので、今のところ余り実害はないが、将来、陽電子を TRISTAN へ入射する際には、入射時間が長びくので問題となろう。

制御系は7台の小型計算機を使用し、運転に必要最小限のパラメーターを、中央制御室で集中制御し、且つデータ集録ができる程度になっている。最善の制御系を最初から作ることは困難であり、又制御に使用するハードな機器、部品等は急速に新製品に移り行くものであるから、必要の部分から、順を追って作っていく方針に沿ったものである。これまでに優先したものは、安全、ビーム集束系、rf位相制御、各種モニターの選択及び表示、rfのON-off、故障表示などである。その他のものも、用途のつき次第追加されているが、既に使用中のものも順次改善されていく。

### 3. 技術的問題点

現在、PF Linac での一番の難点は、Klystron 内部の arcing であって、Anode-Cathode 間やセラミック絶縁部で発生している。

Klystron 等の大型管球では、加熱排気して封じ切った後は、イオンポンプを動作させているため、清浄な高真空度が保たれている筈である。通常の送信管では、工場で最初に電圧を加える時、放電を生じない程度に、徐々に電圧を上昇させ、最後は定格以上である時間保っておく、いわゆる aging を行ってから出荷するもので、使用者は、定格以下では問題なく使えることになっている。

PF Klystron は、SLAC の XK-5 を基本にして製造され、最大定格は 270 KV となっているので、240~250 KV では耐電圧的には問題ない筈であるが、現実には、240 KV 程度から arcing の回数が多くなる。建設開始当初の試作管は正常であったが、量産に入ってから、このような問題が顕著になってきた。通常の場合であると、使用時間と共に aging の効果もあって、arcng は次第に少くなるものであるが、多数の中には、使用時間と共に、印加できる上限電圧が下ってくるものもある。

一方、Storage ring の 500MHz Klystron のように、CW ではあるが、直流電圧 40 KV で arcing を生ずる例もある。こうなると、内部での arcing は、単に電界強度だけの問題では済まない。今のところ、Cathode 物質の付着、熱処理温度の不足、aging の不足、Diode 共振による誘発などが考えられているが明らかでない。SLAC では、XK-5、UHFBW 350 KW の Klystron 共にこのようなことはない模様である。現在分っているのは、熱処理温度が双方で 500°C と 650°C の相違があることである。日米協力事業に基づき、日本側三層(KEK, 東芝, 三菱電機)と SLAC との間で、大電力 Klystron の共同開発研究を行っているので、この問題も合せて協力解決して行き度い。

大電力 rf window は、Klystron 付属のもの、立体回路に取付けられたものが夫々 4/10 ほどあり、これまで各、2~3 回破損している。Klystron window はセラミック表面に Ti 薄膜を蒸着している、立体回路に取付けてあるものは、当初 Ti Coating を行う予定であったものが、最終段階に至って時間的余裕がなくなり、Coating なしで使用している。先端出力が 20 MW を超えても、負荷側からの反射が少く、平均電力が小さければ使用可能であるが、反射波が大きいと、rf 先端出力が余り大きくなっても、ペンホールなどが発生することがある。目下、TiN を Coating する方向で準備を進めている。

次に、PF Linac で困っていると云う問題ではないが、加速管の aging について参考までに述

べる。最初に大電力マイクロ波を加速管に入れる際、当然、初めから大きな電力を加えるのではなく、加速管内部の真空度や放電の様子を見ながら、徐々に昇圧して行く。PF Linacには總数160本の加速管がある。4本の加速管で1加速ユニットを形作っているが、真空装置の都合から、4加速ユニット毎に区切って、rf agingを行つた。各加速管に5MW以上入るまでに、十数時間かゝり、全部の加速管についてagingが終了するのに、昼夜連続で1ヶ月弱を要した。この時の加速管内の平均電界強度は8MV/mである、一斉試験的には、同種加速管1本に31.5MW入れるのに数時間ですんでゐる。この時の平均電界強度は20MV/mである。この逆転は、テストと多数を實際に処理する場合との相違によるものである。

以上こゝで取上げた事は、全て真空中の放電に関する問題である。全く物質の存在しない完全真空中では、いくら電界強度が強くても、放電は起らないであろう。加速器などで云う真空中の放電特には arcingには必ず物質が関与している。つまり物質やその表面状態等が大きく影響している。

高周波電界によって生ずる Break downの発生限界の目安として、良く知られた Kilpatrick の criterion というものがある。これによれば、その限界は、3,000 MHz で50 MV/m、200 MHz で15 MV/m、10 MHz で3 MV/mである。S-bandや200 MHzは現用加速器の実例が多いので、その動作実をみると、殆んど限界以下で使用されている。この限界はいわゆる絶対的限界でなく、経験的のもので、技術の進歩と共に変るであろうが、現在での実用的限界とみれば、これに近づくか或は上まれば、それだけ苦しくなることを示すとみてよいであろう。

Klystronなどの印加電圧は、通常μS領域のパルスであるから、これを入れ10 MHz附近とみると、XK-5やPF Klystronでは、その限界よりずっと高い29 MV/mとなっている。

装置が余り大きくなく、手回しと暇をかけて処理できるもの、見かけ上電界強度が大きくても、実際の電極間電圧が小さいものなどは、この限界を超えても不思議はない。

PFのKlystronは処理しやすい範囲に入るものであるが、上記限界を遙かに超えており、SLACに於ける例などからみても、30 MV/mを超えることは、現状ではそれ程容易ではなさそうである。

何れにしても、装置の材質、加工、表面処理、二次電子放射の抑制などはばかりでなく、実施段階では人手を掛けるにも限界がある。新しい加速器建設の際には、このことも当初から充分考えておく必要がある。