

PRESENT STATUS OF RF TRIP AT THE KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

Yoshiharu Yano¹, Mitsuo Akemoto, Hiroaki Katagiri, Tetsuo Shidara,
Tateru Takenaka, Katsumi Nakao, Hiromitsu Nakajima, Hiroyuki Honma,
Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Mitsuhiro Yoshida, Shigeki Fukuda
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

Abstract

The KEK electron positron linac began operating in 1982 as the 2.5 GeV injector for the PF. Then it started injecting electron/positron beam to the TRISTAN ring. After the upgrading the energy from 1994 to 1997, it has been providing e-/e+ beam to four different rings; PF(e-), PF-AR(e-), KEKB(e-), and KEKB(e+). In January 2004, KEKB has started a continuous injection mode (CIM), in which stored currents are kept nearly constant in e- and e+ rings of KEKB. Though annual operating hours reach up to 7000 hours, the maintenance hours decrease after adopting the CIM operation. In this report, we describe the history of the rf trip rate of the klystrons including VSWR-trip and the efforts how to reduce the total numbers of rf trip events under the decreasing maintenance activity.

KEK電子・陽電子入射器におけるRFトリップの現状

1. はじめに

電子陽電子入射器は1982年にPF入射器として建設され、電子加速器としての運転が開始された。1986年にはTRISTANの入射器としても稼働を始めPFには電子、TRISTANには電子と陽電子を供給する運転が始まった。1998年にはそれまでの入射器を大幅に改造しKEKBの入射器としても運転が開始された。現在は4つの異なるリングPF(e-)、PF-AR(e-)、KEKB(e-)、KEKB(e+)にビームを供給している。通常の運転ではPFが1日1回、PF-ARが1日2回、その他ほとんど全ての時間をKEKBの入射に費やしている。2004年から始まったKEKBへの連続入射により入射器の運転は、それまでの1時間ごとの入射にくらべ非常に過酷なものとなり機嫌の悪い機器のおもりをする時間もとれない状況にある。その中で線形加速器の宿命でもあるRFのトリップをいかに減少させ安定な運転を目指してきたかを報告する。

2. 安定な運転の為の装備

2.1 モジュレーターのインターロック

クライストロンの電源であるモジュレーターには様々なモニターが装備されており些細な異常でもそれが重大なトラブルを引き起こさないように2重、3重にインターロックがかけられている。自分自身のため、クライストロンのため、加速管等負荷を守るために様々なインターロックでトリップが発生する。しかしそのほとんどは加速管等負荷で発生した放電による反射で返ってきたRFからクライストロンを保護するために働くVSWRメーターによるインター

ロックである。

2.2 VSWRメーター

VSWRメーターはクライストロンの出力導波管に設置された方向性結合器(ベータホールカップラー)で検出したRF出力パルスと負荷側からの反射パルスを測定し、電圧定在波比(VSWR)を算出する機器である。さらに設定値以上のVSWR値を検出するとインターロック信号を出力しRFを停止する事が出来る。これにより負荷側で発生した反射波によりクライストロンが損傷を受ける事を未然に防ぐことが出来る。

運転に使用しているクライストロンは59本ありそれぞれのモジュレーターにはVSWRメーターが設置されインターロックによりHVを止める事が出来る。上流からA~C、1~5セクターの8つのブロックに分けられそれぞれにサブブースターを設置し、各々のサブブースターが各セクターのクライストロンをドライブする形を採っている。

入射器加速ユニットの基本形はクライストロンから出力されたRFをSLEDにより増幅し3dBハイブリッドにより4分配した後4本の加速管に供給する方式である。クライストロンへ戻ってくる反射波としては、RF窓、導波管のバンド部、3dBハイブリッド、加速管、ダミーロード等で反射したRFが主なものである。反射の原因は2856MHzの基本波における調整不足による不整合、加速管での共振器としての過渡現象、高調波に対する不整合が考えられる。KEKBに向けて増強された部分(A, Bセクター)に関しては立体回路に反射波対策がなされている^[1]。つまり、加速管からの反射波については立体回路の構成により3dBハイブリッドにおいて上流側加速管と下流側加速管

¹ E-mail: yoshiharu.yano@kek.jp

からの反射波が 180° の位相差を持つように導波管長が決められている。このためA, Bセクターの加速管からの反射波形にはヒゲ状の反射はほとんど無いが、Cセクター以降については改造前の立体回路を使用しているため図1の例のように加速管からの反射波形にRFの立ち上がり、位相反転、立ち下がりにおいてヒゲ状の反射が見られ、VSWRメーターのベース値は1.05以上、高いものについては常時1.20以上を示しているものも数多くある。クライストロンのスペックからVSWRの値は1.30以下が要求されているためこれらのものは非常にトリップしやすい状況にある。

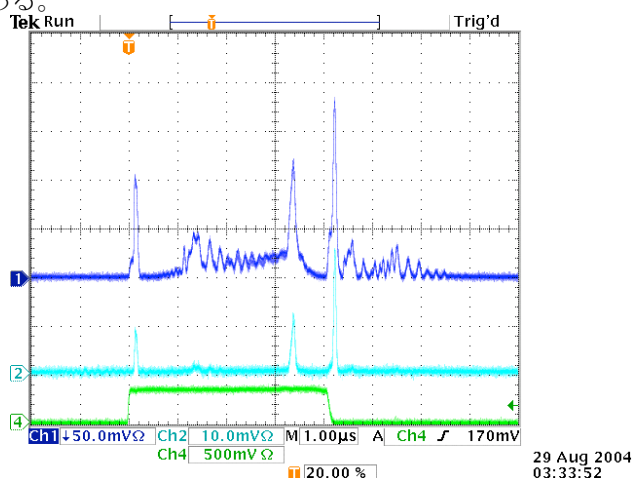


図1 (KL-11)

ここでch1はクライストロン出力の反射波(Pb)を外部の検波器で観測したもの、ch2はPbをVSWRメーター内部の検波器で観測したもの、ch4はクライストロン出力の進行波(Pf)をVSWRメーター内部の検波器で観測したものである。

3. 如何にRFトリップを減らすか

3.1 これまでの対策

現用型のVSWRメーターの導入は1997年からであるがサイラトロンが発生するノイズ等に悩まされ様々な改良がなされてきた。タイミング系のトラブル、ピークホールド回路を採用した為の問題点、オペアンプのオフセットによるベース値の増加等それぞれに対策を講じてきていた。

3.2 さらなる改造と調整

インターロック系に残された問題点としてVSWRのインターロックが動作しても系全体の遅れからHVが停止するまでの間2~3パルスのRFが出力されてしまう現象があった。この点を回避するためHVのトリガーをVSWRメーター経由としインターロック発生と同時にトリガーを停止し本体のインターロックが動作するまでの間トリガーが通過しないよう改造した。以前オペアンプのオフセットからくるベース値の発生を避けるためマイナスオフセットをかけていたものをゼロオフセットとしベース値の変動を観察する

事でモジュレーター診断の参考にした。サイラトロンの寿命が近づくともスイッチングのタイムジッタの増加やノイズが多くなりVSWRメーターのベース値に影響を及ぼす傾向があるため指針としている。SLEDの微調整でベース値の低減を図った。RFの立ち下がり部分で発生するヒゲ状の反射波形を低減するためタイミング調整によりHVの立ち下がり部分にRFの立ち下がり部分を重ねた。その他様々なモジュレーターの改良を実施しサイラトロンの受け入れ検査も強化し納品された全てのサイラトロンに対し100時間のランニング試験を実施している。

3.2 コンディショニングとEs設定

夏の長期メンテナンス後にほぼ2週間かけてコンディショニングを行い、その後ほぼ1年間の運転に入る。立ち上げ時には $E_s=43\text{kV}$ を目標値としコンディショニングを進め、目標値に達したのから運転値 $E_s=42\text{kV}$ に設定していく。ただし様々な制約から全てのクライストロンが $E_s=42\text{kV}$ で運転できる訳ではなく状況に応じて運転値は決められる。通常3本程度のクライストロンがスタンバイの状態では開始される。

3.3 安定な運転のために

単純にRFトリップの回数を減らすには E_s の設定値を下げてRFのパワーを減らせば良いがスタンバイのクライストロンが無い状態での長期運転は考えられないため際限なく E_s を下げる訳には行かない。出来るだけ運転値の E_s を保ったまま運転を続けるため2002年半ばからオペレーターに次の事を励行してもらっている。RFトリップが5回以上連続した場合は E_s を1kV下げて様子を見る。それでも収まらない場合はさらに下げてゆくが状況に応じてスタンバイを切り替え問題が起きている加速管を休ませる。(以前はここで無理をして加速管を傷め復帰させるのに3~4ヶ月かかったこともあった。)加速管の真空等を監視し問題が無ければ元の E_s まで戻し運転を続ける。しばらく休ませた加速管はコンディショニングの後 E_s を運転値に戻し復帰させる。

4. RFトリップの推移

様々な改良と調整及びオペレーターの努力により対策前は年間70,000回もあったRFトリップの数が年間13,000回程度に低減された。

年度	RFトリップ数	RFトリップ数 /週	RFトリップ数 /時間
1999	70,011	~1600	~9.5
2000	39,380	~900	~5.4
2001	22,724	~500	~3.0
2002	17,372	~400	~2.4
2003	17,462	~400	~2.4
2004	12,956	~300	~1.8

表1

表1にKEKBへのビーム供給が本格的に始まった

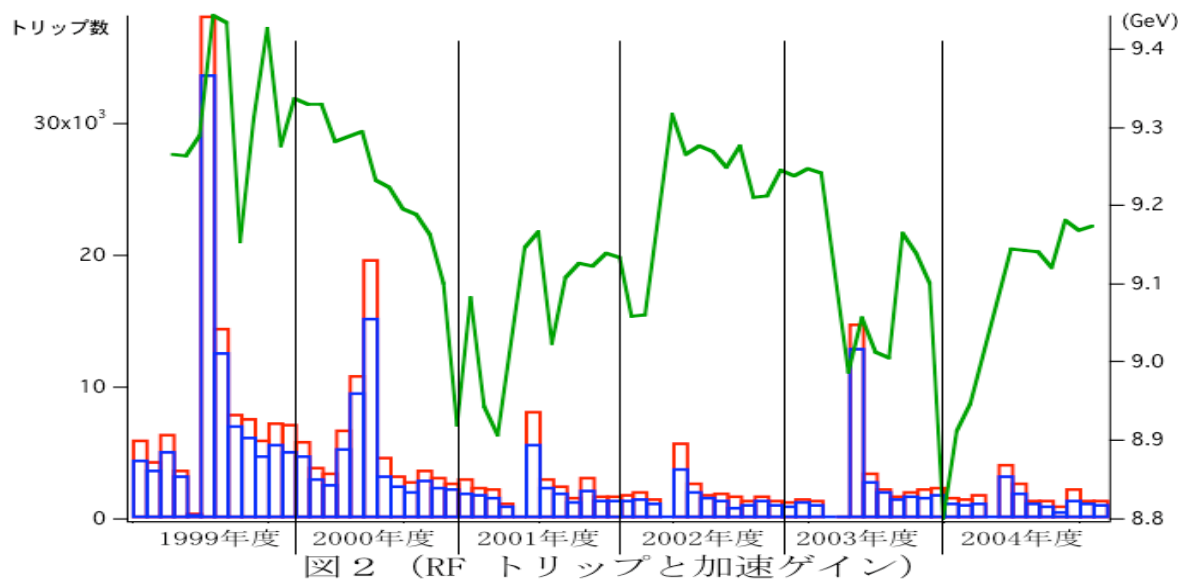


図2 (RF トリップと加速ゲイン)

1999年からの年度ごとのRFトリップの回数を示す。ここで8月、9月のトリップ数はコンディショニング時のものとしてカウントしていない。

これからわかるように1999年当時はEsの設定値を高めにしていたため現在と比較すると非常にRFトリップが多いことがわかる。

図2に1ヶ月間のRFトリップの発生状況を年度ごとにまとめてある。ここで赤はトータルのトリップ数、青はVSWRメーターによるトリップ数である。折れ線はその月の加速ゲイン（未校正）である。

これから解るように対策前の1999年度では運転時のEsを比較的高く設定していたためトリップ数も非常に多く加速管、窓、クライストロンを傷めていた事が解る。2000年度の夏以降はVSWRメーターの改造とEsの設定値を多少低めにした事が功を奏し運転時のトリップが減少している。2001年度以降も夏期メンテナンス後の立ち上げ時、運転時ともに減少している。2003年度の夏期メンテナンス後の立ち上げ時には原因不明で4セクターの半数以上のVSWRメーターのベース値が1.30付近から下らず通常運転に入るのが困難になった。タイミング調整によりHVの立ち下がり部分とRFの立ち下がり部分を重ねることでヒゲ状の反射波形を低減し通常の運転に入る事が出来た。大幅に加速ゲインが下がっているところは加速管等のトラブルでRFパワーを下げている時期である。

5. 今後の課題

2004年度の後半に1週間のRFトリップ数が200を切りそうな時期もあったが現在は300前後を推移している。1週間のトリップ数200を切るためには常にトリップ数が多いクライストロンのEs設定値を下げる事が最も簡単な方法として上げられるが、全体の加速ゲインの低下を招くため安易には実施できない。

不安定な事が解っているサブブースターC(SB-C)

については今年のメンテナンスで交換予定である。

1セクターのクライストロンは全体的にVSWRメーターのベース値が高くトリップ数も多いためタイミング調整によりヒゲ状の反射波形を低減させたいが、1セクター最下流のKL-18は陽電子ターゲット下流である2セクター上流の加速管にパワーをフィードしておりSLEDを使用していないため1セクターのサブブースター(SB-1)のパルス波形を調整する事が出来ない。KL-18がSB-1から独立すれば可能となる。その他、新しい試みとしてクライストロンの入力直前にRFピンスイッチを導入し加速管からの反射波をトリガーとしてRFを停止する方法が考えられる^{[2][3]}。ここでRFを停止する事が出来れば最小限の遅れでパルスの途中でRFを止める事が可能になる。つまり、加速管で放電が起きた場合速やかにRFを止め、エネルギーの供給を絶つ事で放電部位の損傷を最小限に食い止められる事が期待される。この方法は、SLEDを使用している加速ユニットに対しての効果は期待できないが、SLEDを使用していないA-1、2-1、1-8の加速ユニットに対しては有効であろう。

参考文献

- [1] I. Sato, et al., “放射光入射器増強計画-KEKBに向けて-”, KEK Report 95-18 March 1996.
- [2] M. Ikeda, et al., “リアルタイムRFパルス短縮用トリガーシステム”, 第29回リニアック技術研究会プロシーディングス, Aug.4~6,2004
- [3] Y. Yano, et al., “リアルタイムRFパルス圧縮システム”, 第29回リニアック技術研究会プロシーディングス, Aug.4~6,2004