

Klystron rf stabilization at ATF Linac

T. Sakamoto, M. Higuchi, H. Hayano*, T. Naito*, and S. Takeda*

Tohoku-Gakuin University
 Chuo 1-13-1, Tagajyo, Miyagi 985 Japan
 *High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The beam stabilization of ATF Linac is the first priority problem in the usual beam operation. One of major problem is a beam energy drift and an energy spread drift. Since the beam energy and energy spread is fully correlated with a stability of rf pulse from the klystron, the investigation of rf pulse stability has been done. The measurement of rf amplitude and phase of klystron were performed in short time of pulse to pulse basis and in long time period. The measurement result is described and discussed here.

ATFリニアックのクライストロンrf安定化

1. はじめに

ATF1, 54GeVリニアックにおいて、現在観測されている昼夜および数十分にわたる数%のビームエネルギードリフトは安定なビーム入射が必要なダンピングリングのビームエミッタンス開発にとって重大な障害となっている。このドリフトは長周期のものはクライストロン室の昼夜の温度変化が基準信号伝送系に電気長変化を起こして発生しているものであり、短周期のものはクライストロン本体の冷却水の温度ドリフトから発生しているものである。いずれの場合も加速rfの位相変化が引き起こされ、その結果ビームエネルギーが変化する現象である。またそのような長期ドリフトとは別にパルス毎のビームエネルギージッターもまたダンピングリングのビームエミッタンス開発にとって重大な障害となっている。本稿ではそのような障害を発生させている原因を追求するため行なったクライストロンrfパルスの測定の詳細について報告する。

の安定度測定はオシロスコープ (TEK TDS684B) で行ない、GP-IBを介してHP-VEEソフトウェアによりデータ取得を行なった。図1に示す様に、rfパルス振幅はダイオードを用いた検波波形振幅で、またrfパルス位相はダブルバランスミキサーを使用した0点出力付近での位相検出方式により行なった。パルス振幅および位相はオシロ上でのオフセット機能を使用しさらに十分拡大して0.1%以下のビット精度で計測された。クライストロンは25Hzで運転されているが、測定のため1サイクルが数秒かかるので測定サンプリングはそれ以上あげることではできなかった。しかしながらパルス毎の変動以外の長期変動に関しては十分高速でありむしろVEEソフトウェアのデータ取得に時間遅延を入れて長時間測定した。

3. クライストロンrfパルスの長期変動測定

リニアック運転においてエネルギードリフトが見られておりその時間スケールよりリニアックrf系のいずれかの部分の温度依存性が予想された。そこでクライストロンrfパルスと温度変化との相関測定を行ない、温度依存性のある部分の同定を行なった。その結果、クライストロン冷却水の温度変化とクライストロン出力rfパルスの振幅および位相変化との間に強い相関があることがわかった。その測定結果を図2に示す。この図からわかるように、クライストロン冷却水温度が約25分周期で5℃変化しており、これにともなってrfパルス振幅が約1%、rfパルス位相が5°変化している。クライストロン冷却水は全てのクライストロンに共通に一系統であるのでこの変動により加速位相の同期した変動および加速振幅の同期した変動が発生している事になる。

一方、昼夜にわたるエネルギー変動は空調されていないクライストロン室の温度変化の影響を受けているものから来ると考えられる。そこで、まず考えられる加速周波数基準信号(2.856GHz)分配系

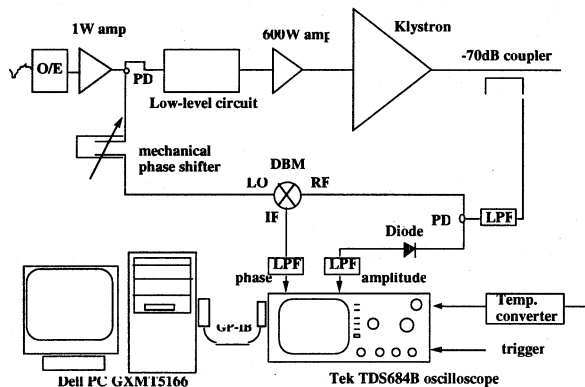


図1 クライストロンrfの測定セットアップ

2. クライストロンrfパルスの測定装置

ATFリニアックのクライストロンrfパルス

の光ファイバーを疑いその位相変動を室温変動とともに測定した。光ファイバーの基幹部分は温度安定なものを使用しているが、配線の都合上スプライスボックスを介してしなやかな通常のファイバーケーブルに変換され約20mの配線の後クライストロンローレベル回路に接続されている。この通常のファイバーケーブルの温度安定度が悪いので室温変化で位相変化（電気長変化）を引き起こしている物と考えられる。測定は2系統の伝送ラインを使用し送った基準信号をもう一つの伝送系で送り返し、送り側で位相比較をすることで行なった。位相測定法などはクライストロンrfパルス測定時と同じである。結果は24時間で5℃の室温変化に対し伝送ライン1系統で約15°の位相変化が見られた。

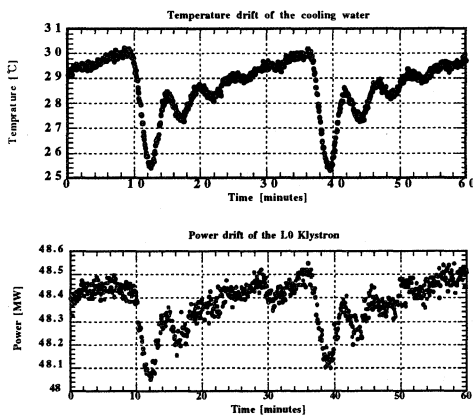


図2-1 クライストロンパワーと温度の相関

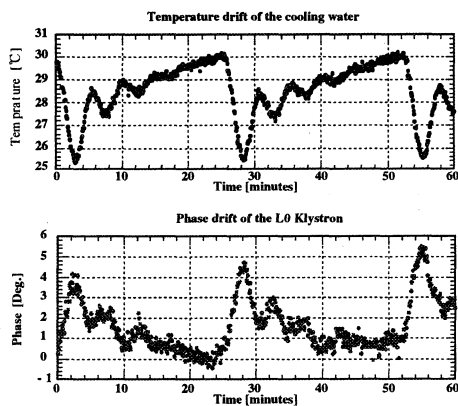


図2-2 クライストロン位相と温度の相関

これも各クライストロンで同様の伝送系を組んでいるので位相変化は全クライストロンにおいて同期して同方向であり電子銃からのビーム入射タイミングがそれらとは違って固定されている場合、

加速ビームエネルギー変化とエネルギー Sprett 変化を引き起こしている事が予想される。昼夜にわたるエネルギー変動はこの原因のほかにもクライストロンローレベル回路の室温依存性や出力導波管の室温依存性が考えられ、今後調べて行く必要があるが、空調施設がこれらの問題を解決することはいうまでもない。

4. クライストロン rf パルスのパルス毎変動の測定

クライストロン電源はパルス電源によりクライストロン内電子ビームを生成しそれにRF変調をかけバンチングさせ出力空洞から増幅されたRFを取り出すものであり、加速パルス電圧(HV)の安定度が増幅されたRFの振幅と位相の安定度を定めるものと考えられる。加速パルス電圧はPFNキャパシターに充電される電圧からサイクロトロンスイッチ動作にて作られるので、PFN充電電圧とサイクロトロン放電安定度から出力RFの安定度が決められているものと考えられる。サイクロトロン放電安定度の計測は困難であるので、本研究ではPFN充電電圧と出力RFとの相関に注目することにした。なお、出力RFの振幅と位相の安定度は直接加速管内電場の安定度と結び付いているので、この安定化は極めて重要である。目標値としては全幅で0.1%程度の振幅安定度と1°以下の位相安定化が望まれる。

安定度測定は同様にオシロスコープで行ない、GP-IBを介してVEEソフトウェアによりデータ取得を行なった。出力RFの振幅および位相安定度とPFN充電電圧との相関は、図3に示す様に計測された。その結果、RF振幅の安定度は±0.2%であり、PFN充電電圧の安定度±0.05%とはっきりした相関が見られた。

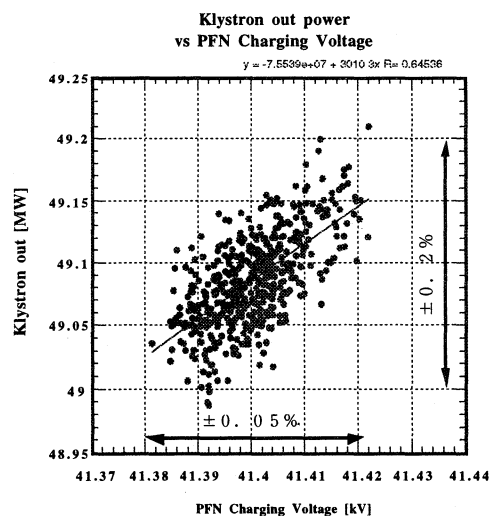


図3-1 出力RFの振幅とPFN充電電圧との相関プロット

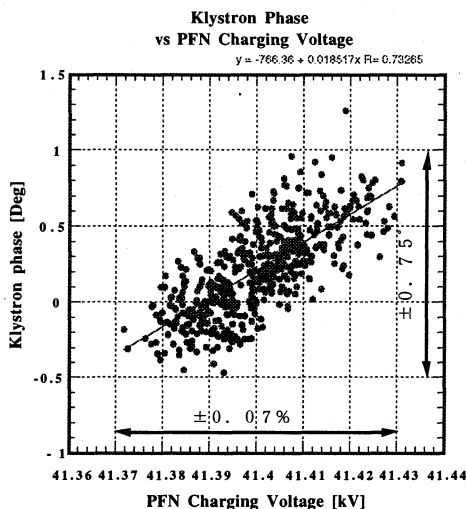


図3-1 出力RFの振幅とPFN充電電圧との相関プロット

またRF位相の安定度 $\pm 0.75^\circ$ であり同様にPFN充電電圧とはっきりした相関が見られた。すなわち出力RFのジッターはPFN充電電圧に起因している事がわかった。しかしながら分布に広がりがあることからわかるようにそれ以外の要因、例えばサイラトロン放電の不安定性やドライブRFの不安定性、さらにはサイラトロンやクライストロンのヒーターパワーの不安定性、クライストロン収束コイル電流の不安定性などが存在することが考えられる。

5. 長期変動安定化のための対策

3節に示したクライストロンrfパルスの長期変動は基本的には温度高安定なクライストロン冷却水系と温度高安定なクライストロン室空調系があれば解決する問題であるが、規模の大きいリニアックの場合そのコストは膨大なものになる。当面コスト的に考えられる対策は、クライストロン本体系冷却のみを高安定な加速管冷却系から分けて配管する、基準信号系に対しては通常型ファイバーケーブルを温度高安定型ファイバーケーブルに置き換える事である。さらに高安定にするためには、各所に位相フィードバック回路を組み込む必要がある。クライストロン出力位相のフィードバック回路は試作され実際に組み込んでテストできる段階にあるが、このような回路を各クライストロンに次々と組み込む必要がある。これにより、クライストロンローレベル回路の室温依存性や出力導波管の室温依存性が除去できる事になる。

6. パルス毎変動安定化のための対策

これら出力RFを目標値まで安定化を計るためには、PFN充電電圧を0.05%まで安定化しなければならないが、それが困難であったとしてもこの相関を利用する方法が考えられる。すなわちPFN充電電圧を高精度短時間で計測しサイラトロンがスイッチオンするまえにクライストロン入力RFの位相を補正する方向にセットするフィードフォワードである。PFN充電電圧は16ビットADCにより変換時間 $50\mu\text{s}$ 程度で計測され、これよりフィードフォワード移相量が計算されその後16ビットDACにより変換時間 $50\mu\text{s}$ 程度でフェーズシフターにセットされる。なぜなら振幅制御ができないのでそれを位相制御で行なう必要があるからである。この一連の作業は1ms以下で終了するので、サイラトロンがトリガーされる1ms前にこのフィードフォワード動作を開始すればよい。その結果PFN充電が毎回ジッターを持って行なわれてもその分のビーム加速変移は補正可能であろう。実際問題このフィードフォワードによればパルス毎のRF不安定を現状の約半分にすることが可能であることを図3が示している。そしてその時加速RFは全幅で 1° 以下の位相安定度が得られることになる。ただし振幅安定度は位相により補償しなければならない。

7. 今後の課題

対策のところでも述べた様に、クライストロンrfパルスの安定化には高温安定な環境が必要であり、高振幅安定なクライストロンパルス電源(変調器)が必要であるが、これが実現できない様な状況下では、付加回路により安定化をしなければならない。クライストロン位相の長期変動安定化の為にはクライストロン出力位相のフィードバック回路を付加し、クライストロン振幅位相のパルス毎変動安定化の為にはフィードフォワード回路を開発する必要がある。これらの付加回路はほとんど準備完了の状態にあるので、今後はこれらの実験的開発研究を行なっていく予定である。

8. 謝辞

最後に本開発研究をご理解いただき測定実験に参加しあるいは議論して下さった他のATFの方々には深く感謝致します。なお本研究は、決してATFリニアックだけのためではなく広く他のリニアックにも応用可能なものであると考えています。