

# RF PHASE DRIFT COMPENSATION WITH A FUNCTION GENERATOR

K.Yokoyama<sup>\*)</sup>, I.Sato<sup>A)</sup>, K.Hayakawa<sup>A)</sup>, T.Tanaka<sup>A)</sup>, K.Sato<sup>A)</sup>, Y.Hayakawa<sup>A)</sup>, Y.Matsubara<sup>A)</sup>,  
H.Nakazawa, T.Sakai, K.Kanno, H.Inokawa, Y.Nakamura and K.Ishiwata

College of Science and Technology, Nihon University  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan  
<sup>A)</sup>Atomic Energy Research Institute, Nihon University  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan

## Abstract

The fluctuation of the accelerated electron beam energy in the linac at Nihon University has been a serious problem for the application to the FEL experiment. The relative phase drift greater than  $7^\circ$  between the rf source and the rf amplifier output, which was the main reason of the fluctuation, has been improved considerably at the preliminary experiment of a phase compensation. The phase compensation has been performed by applying the phase control signal generated with a function generator to a fast  $\lambda/4$  controller. The control signal has been adjusted so as to be proportional to the inverted voltage waveform of the detected phase drift. The phase drift could be suppressed to within  $\pm 0.5^\circ$  by this method. Also the fluctuation of the electron beam energy was improved considerably over the rf pulse duration of  $20\mu\text{s}$ .

## 関数発生器を用いた日大 FEL 用リニアック RF 系の位相変動補償

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設<sup>[1]</sup>では、紫外線領域における自由電子レーザー (FEL) 発振に向けて、電子線形加速器の性能改善を行っている。当施設の電子線形加速器は、DC 電子銃から引き出した電子を 2856MHz の RF で最大 125MeV まで加速する。加速 RF はクライストロン 2 台で供給する。クライストロンのドライブ用 RF アンプにはトランジスタを使用しており、位相がパルス持続時間の間に変動することは避けられない。RF 出力電力の位相変動は、クライストロン相互でも異なっている。その結果、パンチしたビームは加速する RF の位相変動によって、そのエネルギーが時間的に変動する。このようなビームを運動量分析系に輸送しエネルギー幅を 1% 程度に制限すると、ビーム電流が大きく変動する。他のビーム不安定要素も考えられ、これらの不安定性は FEL の発振を難しくしている。この位相変動は、RF アンプの前段にある高速移相減衰器の制御信号により補償する。このテストを行なったので、この方法による位相変動・電子ビームのエネルギー変動の改善結果について報告する。

### 2. 位相変動補償の方法

#### 2.1 構成

本施設の電子線形加速器は、DC 電子銃、プレバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本で構成されている。2 本のクライストロンはそれぞれ独立した

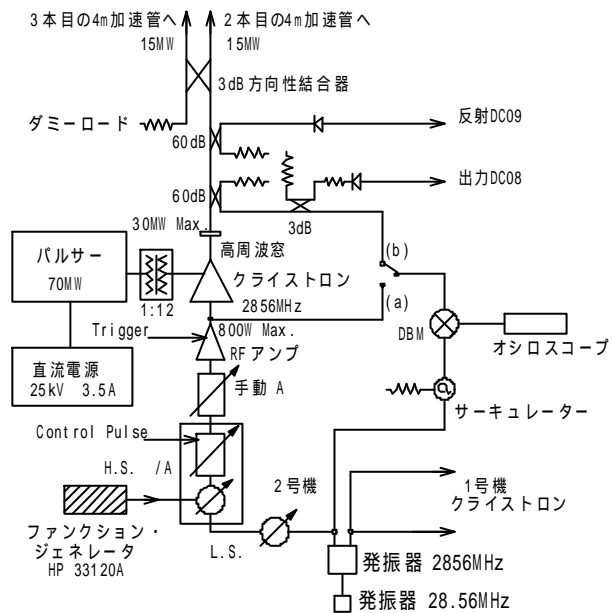


図 1 . クライストロン 2 号機 RF 系の構成図。

RF アンプでドライブしている。クライストロン 1 号機は、プレバンチャー、バンチャーと 4m 加速管 1 本の加速ユニットに、2 号機は 4m 加速管 2 本の加速ユニットにそれぞれの RF を方向性結合器で分割して供給している。クライストロン 2 号機 RF 系の構成を図 1 に示す。1 号機もほぼ同じ構成である。

<sup>\*)</sup> K.Yokoyama, yokoyama@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

2856MHz 発振器は 28.56MHz でフェイズロックしている。この信号を図 1 に示すように低速移相器を通し RF アンプに供給する。RF アンプの前段に、位相と振幅の制御、すなわち高速位相減衰回路(PIN ダイオード)を設けてある。低速移相器では、クライストロン 1 号機と 2 号機の RF 出力の位相を相対的に調整する。高速減衰器では、矩形波の制御信号を入力し、RF 出力をパルスにする。この RF は手動の可変減衰器を通して RF アンプに送られ、最大 800W に増幅される。さらにクライストロンで最大 30MW に増幅され電子加速に使用している。今回のテスト実験におけるクライストロン運転条件<sup>[2]</sup>は、繰り返し 2Hz、パルス幅 20 $\mu$ s、パルスモジュレータ入力電圧は 1 号機が 20kV、2 号機が 19.5kV である。またフィードバック系を含む RF 位相安定化回路<sup>[3]</sup>は使用していない。位相変動はダブル・バランスド・ミキサー (DBM) を用いて発振器と出力 RF との間の位相を測定している。

## 2.2 方法

DBM を使うと、RF 源に対する RF アンプ出力位相の時間変化が測定できる。位相と電圧の関係は、DBM 出力の正の最大電圧から負の最大電圧までの変化が 180° の位相差に相当する。DBM の出力が 0V 付近では直線性が良く位相変化が高精度で測定できるので、位相は低速移相器であらかじめ 0V 付近になるように調整した。1 号機、2 号機とも DBM の出力電圧 1mV は約 0.5° の位相に相当する。RF 源に対する RF アンプ出力位相差 (図 1 中(a)) とクライストロン出力位相差 (図 1 中(b)) を DBM で検出した電圧を図 2 に示す。RF アンプ出力位相は、RF の立ち上がりからなだらかに減衰変化している。これは 800W パルス RF アンプ (トランジスタアンプ) で位相が時間的に変動していることを意味する。これに対し、クライストロン出力は、RF の立ち上がり直後に大きな変動があり、それ以降は変動しながら減衰している。これは、パルスモジュレータ入力電圧 20kV の場合、パルスの始端の変動は過渡電

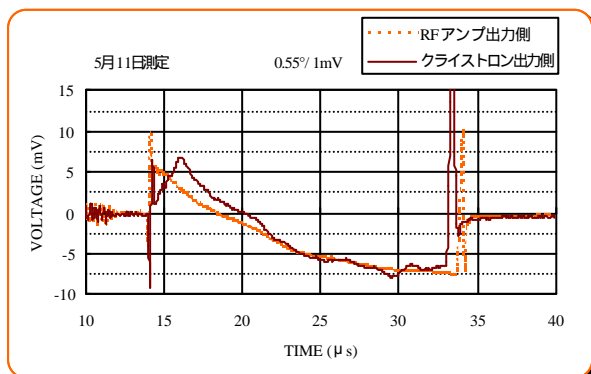


図 2 . RF 源に対する RF アンプ出力 (点線) 及びクライストロン出力 (実線) をダブル・バランスド・ミキサーで検出した電圧変動。

圧の影響であり、以降は PFN 不整合による 0.3% 程度の電圧変動に起因する位相変動で 1.6° 程度と評価された。

RF 系の位相変動補償は RF 源とクライストロン出力の位相差を DBM で検出した波形出力 (電圧) を基本としている。DBM で検出した信号をオシロスコープからパソコンに読みこみ、受信した波形と同じ形の関数と反転した関数を作り、この関数を関数発生器に送信し位相補償波形を発生させた。関数は RF パルス立ち上がり立ち下りの過渡部を除く波形に対して作成した。この関数発生器で発生させた電圧信号を高速移相器に入力し位相変動を行なった。このとき、DBM からの検出信号が最も平坦になるように関数の出力振幅と発生タイミングを調整した。また、作成した 2 つの関数のうち位相変動が抑制される極性を用いた。これらの手順は、2 台の関数発生器とオシロスコープを GP-IB により 1 台のパソコンに接続し、Visual Basic で作ったプログラムでコントロールされる。関数発生器で発生させた関数波形と関数を発生させる前後の DBM からの位相差検出信号を図 3 に示す。このグラフからわかるように、関数入力前では  $\pm 4.2^\circ$  程度あった位相変動が、高速移相器を関数制御した結果、位相変動を  $\pm 0.5^\circ$  にすることが出来た。

## 3. 結果と考察

クライストロン 1 号機および 2 号機とも、DBM で検出した RF 源に対するクライストロン出力位相変動は  $\pm 0.5^\circ$  以内に補償できた。補償したときと補償がない場合の加速器の電子ビーム電流波形を図 4 に示す。これは、加速器下流の 45° 偏向電磁石 2 台 (アナライザー) で電子ビームを曲げた後、アンジュレータ下流のビームダンプを使用したファラデーカップで検出した電流波形である。このとき、エネルギー幅は 1%、電子ビームエネルギーは 98MeV、電子ビーム電流は加速器出口で 88mA である。2 本の点線は位相変動補償前の電子ビームの電

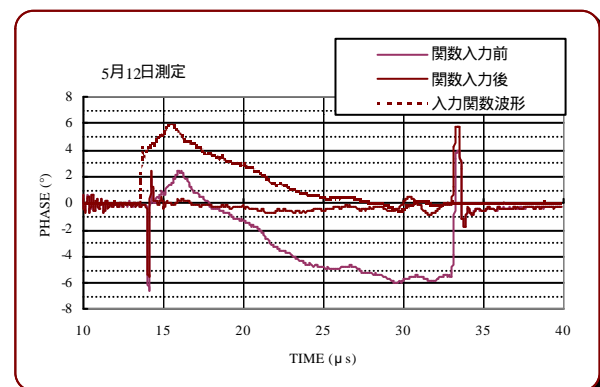


図 3 . ファンクション・ジェネレータによる位相変動補償の効果。ただし、入力関数に関しては関数の出力振幅と発生タイミング調整をせず、関数の形だけを表示している。

流波形である。入射部で位相調整をしても、パルス幅  $20\mu\text{s}$  の電子ビームは半分程度しかアナライザーシステムを通過しなかった。実線は位相変動補償を行なったものである。パルスの先端部から終端部まで、位相変動補償によってエネルギー変動が大きく改善されてアナライザーシステムを通過していることがわかる。しかし、パルス持続時間内でも各パルス間でもビーム電流の変動は不定期におこり運転中に位相調整が必要であった。位相変動補償を行なった場合にみられるビーム電流の変動波形例を図5に示す。パルスの先頭部と後半  $10\mu\text{s}$  付近でビーム電流に大きな変動がみられる。この変動は、パルス毎に異なり、関数発生器で位相変動を補償することで改善できないものである。

位相変動補償前のRF源に対するクライストロン出力位相差の検出波形がパルス毎に位相変動する状態を図6に示す。RFの立ち上がり直後の大きな変動は、RFパルスの先端と終端の位相を位相変動補償によって揃えられたので緩和できた。しかし、パルスの後半  $15\mu\text{s}$  付近での位相シフトはパルス毎に発生する時刻が一定でないためにこの変動に対しては補償できない。これは、位相変動補償に使用している関数は固定でフィードバックしていないためである。パルス毎での位相変動をより小さくするためにはフィードバック系を含むRF位相安定化回路も使用する必要がある。

#### 4. まとめと今後の課題

RF源とクライストロン出力位相の比較を行ない、適切な関数を発生させてこれを高速移相器に制御信号として入力し位相変動補償を行なうことに成功した。この結果、位相変動が  $\pm 0.5^\circ$  以内に抑制された。FELシステムを通過する電子ビームは、パルスの先端部から終端部にかけて、ほぼ平坦なビーム電流波形が得られるようになった。加速ビームエネルギーが改善された結果、アンジュレータから得られる自発放射光強度が大幅に改善された<sup>[4]</sup>。

RF源とクライストロン出力の位相変動が  $\pm 0.5^\circ$  になったが、パルス持続時間内と各パルス間の不規則な位相変動が残っており、電子ビーム電流には依然として変動要素が残っている。また、RFの変動位相は毎日同じ状態ではなく、クライストロン印加電圧や可変減衰器の調整によっても位相変動の様子が変わるので、運転条件を変えたときには位相変動補償用の関数パラメータを変えなければならない。関数の出力振幅と発生タイミングを調整しても位相変動の改善が見られない場合には、関数を作りなおさなければならない。リアルタイムの位相変動補償システムを構築することが今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] I.Sato et al., Proc. of this Meeting.
- [2] T.Sakai et al., Proc. of this Meeting.

- [3] T.Tanaka, et al., "Low Power Rf Phase Stabilizer for LEBRA 125MeV Linac". Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting, in Japan, Sapporo, July 7-9, 1999.
- [4] Y.Hayakawa et al., Proc. of this Meeting.

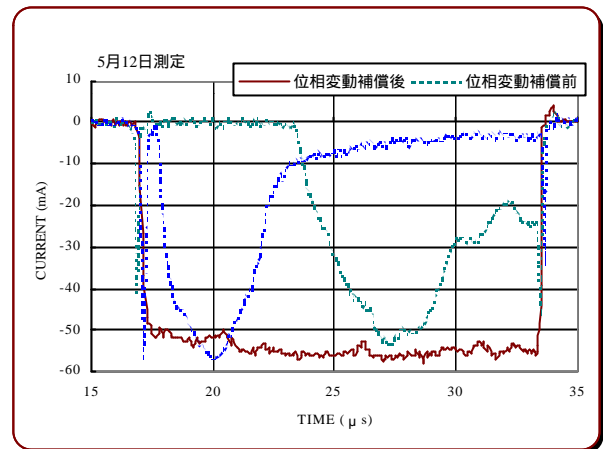


図4．加速器の電子ビーム電流への位相変動補償効果。点線で示した2つの波形は、クライストロン2号機の位相を変えて測定したものである。

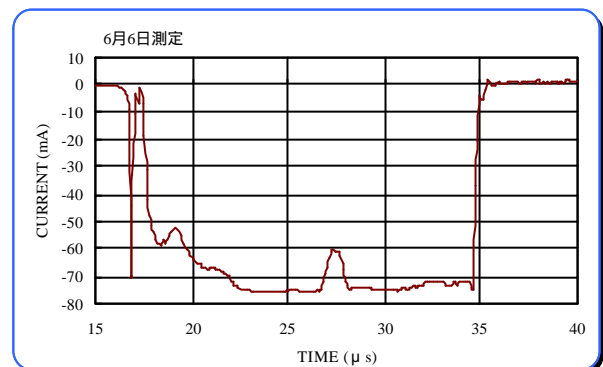


図5．位相変動補償後の電子ビーム電流波形の変動例。電子ビームエネルギーは  $96\text{MeV}$ 、電子ビーム電流は加速器出口で  $106\text{mA}$  のとき。

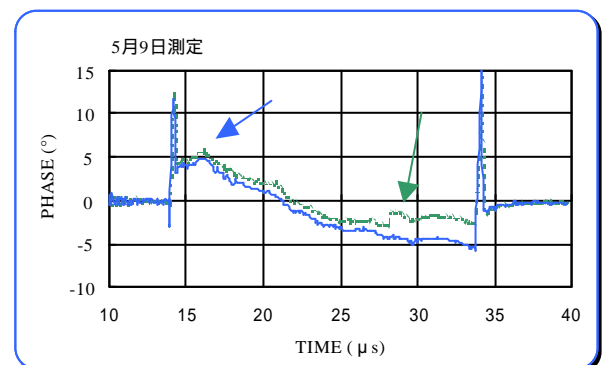


図6．RF源に対するクライストロン出力位相差の位相変動補償前のDBM検出波形。パルス毎に位相変動が異なる場合。