

## RF SYSTEM OF FELI LINAC

Yasutsugu Morii, Yasuyuki Miyauchi, Tomohiro Keishi, Akihiko Koga, Seiya Abe,  
Isao Bessho, Akio Nagai, and Takio Tomimasu

Free Electron Laser Research Institute, Inc. (FELI)  
2-7-4, Kyoumachibori, Nishi-ku, Osaka 550

### ABSTRACT

FELI (Free Electron Laser Research Institute, Inc.) is constructing a Free Electron Laser facility covering from 20  $\mu\text{m}$  (infrared region) to 0.35  $\mu\text{m}$  (ultra violet region), using an S-band linac. The building will be completed in November 1993 and linac will start to be installed in December 1993. RF system of linac for FEL is required of long pulse duration and high stability.

An S-band klystron (Toshiba E3729) is operated in three pulse operation modes (pulse width and peak RF power); 24  $\mu\text{s}$ -24MW, 12.5  $\mu\text{s}$ -34MW, 0.5  $\mu\text{s}$ -70MW. Each klystron modulator has the PFN consisting of 4 parallel networks of 24 capacitors and 24 inductors, and it has a line switch of optical thyristor stack.

### FEL研リニアックのRFシステム

#### 1. はじめに

自由電子レーザー研究所では、電子リニアックによって波長20  $\mu\text{m}$ の中赤外から0.35  $\mu\text{m}$ の紫外域までの自由電子レーザー (FEL) を発振させ、このFELを利用した技術開発をめざしている。93年11月に建屋が完成し、12月より装置の据え付け調整が始まる予定で、現在装置の製作が進められている。

安定で質のよいFELを発振させるために、リニアックの電子ビームには次の点が要求される。

- (1) パルス幅が長い。
- (2) エネルギー幅が小さい。
- (3) ピーク電流が大きい。
- (4) エミタンスが小さい。
- (5) ミクロパルスの周期が安定している。

これを満たすためにFEL用リニアックのRFシステムには、ロングパルスとRF出力と位相の高安定性が要求される。

パルスの幅を検討する際に、FELIXの電子ビームとレーザー出力の関係を示したデータが参考になる[1]。図1に波長35  $\mu\text{m}$ の時の例を示した。電子ビームが立ち上がってから約3  $\mu\text{s}$ 遅れてレーザーが飽和状態の強度になる。さらに波長が短くなるとアンジュレータでのゲインが小さくなるので、レーザーが飽和状態の強度に達するのにより時間を要する。従ってパルス幅数  $\mu\text{s}$ の従来のSバンドのリニアックでは有効利用は難しくなる。上述のFELIXでは20  $\mu\text{s}$ のロングパルスを実現している。そこでFEL研のリニアックでは可視紫外域用に24  $\mu\text{s}$ 、赤外用に12.5  $\mu\text{s}$ 、リングFEL用の蓄積リングへの入射用の0.5  $\mu\text{s}$ の3種類のパルス幅モードとした。

RF出力の安定度を検討するため、電子ビームのエネルギーゲインTとRFの出力Pの関係を調べる。

$$T = \sqrt{(1 - e^{-2\tau})RPL} - \frac{RLI}{2} \left( 1 - \frac{2\tau e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} \right)$$

ここで、Rはシャントインピーダンス、Lは加速管の長

さ、 $\tau$ は減衰定数である。右辺第二項はビームローディングの項で、第一項の10%程度なので無視すると、エネルギーゲインTはRF出力Pの1/2乗に比例する。レーザー側の要求よりエネルギーの変動は0.1%以下に抑えたい。このためRF出力の安定度は0.2%以下が要求される。

クライストロンの出力の安定度 $\Delta P/P$ はカソード電圧の安定度 $\Delta V/V$ と次の関係がある。

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{5}{2} \frac{\Delta V}{V}$$

これより、RF出力を0.2%以下に抑えるには、クライストロン電源の出力電圧の安定度を0.08%以下にする必要がある[2]。

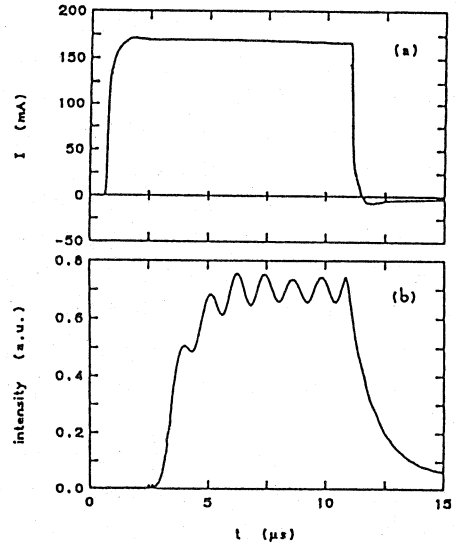


図1 FELIXのビーム電流とFEL光の強度  
(a)ビーム電流 (b)FEL光強度

#### 2. 全体構成

FEL研のリニアックのRFシステムの構成図を図2に示す。

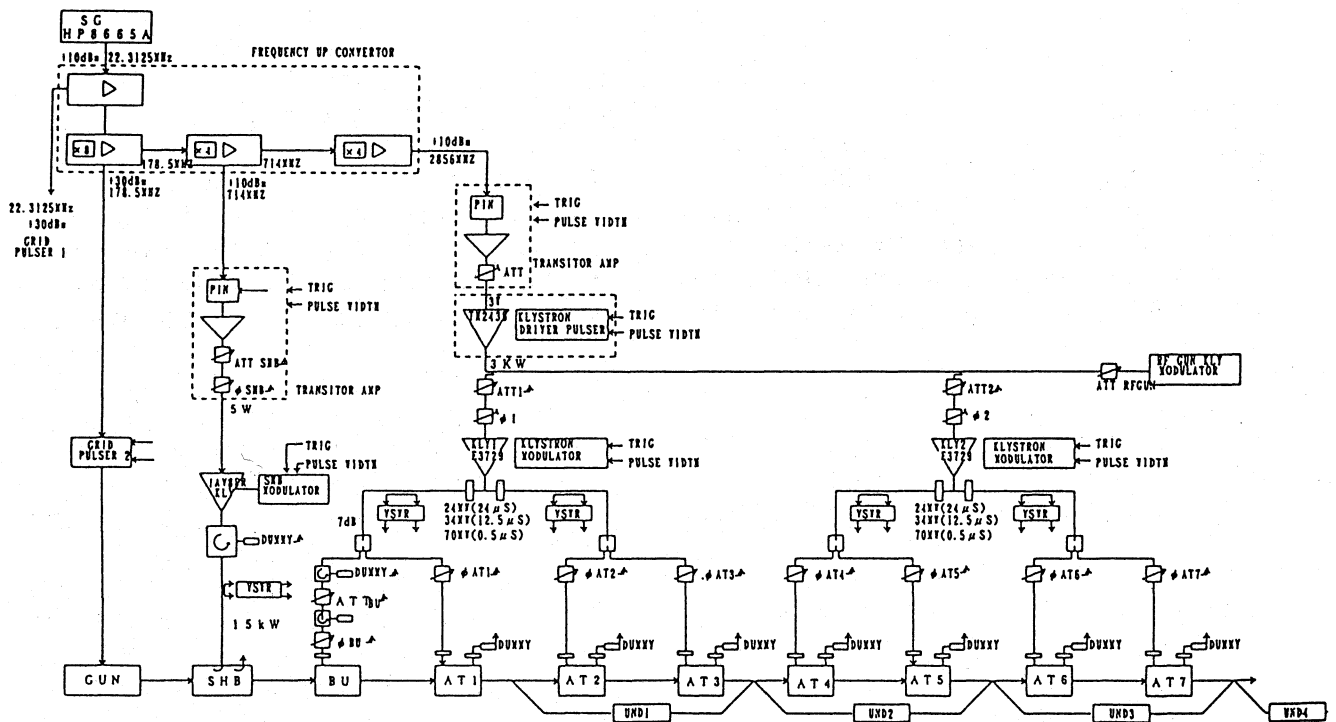


図2 RFシステム全体構成

電子銃は0.5nsグリッドパルス駆動の熱陰極型であり、マイクロパルスの繰り返しは、178.5MHzまたは22.3125MHzであるため、グリッドパルサーにこの周波数のRFを供給している。SHBは2856MHzの1/4の714MHzとした。0.5nsのパルス幅は714MHzに対して約130°に相当する。定在波型バンチャーと7本の3m長加速管は2台のSバンドクライストロン電源より供給する。信号源に22.3125MHzのシンセサイザーを用いて電子銃用、SHB用、加速管用にそれぞれ必要な周波数に通倍した。

ビームのパルス幅とクライストロンの出力は24μs-24MW、12.5μs-34MW、0.5μs-70MWの3のモードがあり、最大繰り返し周波数は10Hzである[3]。

### 3. Sバンドクライストロン

東芝E3712(4μs-80MW、50pps)を基に、30MW程度の低出力でロングパルス運転時の効率を改善したクライストロンE3729を用いた。FEL研の仕様では10ppsとデューティも低いので、E3712のカソードやコレクターをそのまま用いても熱的問題はない。キャビティのチューニングをずらし30MW付近の効率を改善したため、短パルス高出力運転時の効率は若干さがり、70MW程度となる。表1にクライストロンE3729の主なパラメータを示す。

ロングパルス運転時の特性の確認は試験電源の関係もあり、'93年10月にFEL研の実機の電源を用いて日新電機の工場にて実施予定である。

表1 クライストロンE3729のパラメータ

パルス幅(μs)	24	12.5	0.5
ピーク出力(MW)	24	34	70
ビーム電圧(kV)	285	304	390
ビーム電流(A)	308	333	477

### 4. クライストロンパルス電源装置

第1章で述べたように、最長24μsのロングパルスでか

つ0.08%の高安定度を満たすのと、リングへの入射用の高出力・短パルスモードも満たすために、本装置では以下の方式を採用した。構成を図3に示す。

- (1)PFNはモード1で24段4並列、モード2で14段4並列、モード3で3段8並列とした。
- (2)PFNのLは中心導体をモータで出し入れができ、Lの値の調整を容易にした。
- (3)サイラトロンではON抵抗の変動が大きく、パルス出力の高安定化が難しいので、代わりに光サイリスタ東芝SL1500GX22を30段直列接続した半導体スイッチを採用した。サイリスタ点呼のばらつき対策とON時の導通面積の確保のため、過飽和リアクトルを直列にいれ点呼後2μs遅らせてからONしている。このスイッチの運転条件は42kV、10000Aと大変厳しい仕様のため、素子の選択に際しては、寿命試験をメーカーにて実施していただいた。
- (4)充電部は高安定化のため、IVRとDe-Q回路でなく、インバータ・コンバータ方式とした。

表2にクライストロンパルス電源装置のパラメータを示す。図4にはモード1の運転時のパルス波形の計算結果を示す。

表2 クライストロンパルス電源装置のパラメータ

モード	モード1	モード2	モード3
パルス電圧(kV)	285	304	390
パルス電流(A)	308	333	477
75%パルス幅(μs)	30	19	4
有効パルス幅(μs)	24	12.5	0.5
パルス平坦度(p-p %)	0.08	0.08	1.5
パルス安定度(p-p %)	0.08	0.08	1.5
パルス繰り返し(Hz)	10	10	10
パルストランス昇厚比	1:15	1:15	1:18.5
パルス立上り(10-90%)	2	2	2
パルス立下り(10-90%)	3	3	3.5

### 5. Sバンド駆動系

出力3WのC級トランジスタアンプとクライストロン(トムソンTH2436)からなる駆動用高周波源を用意した。TH2436は出力3kW(最大パルス幅26 $\mu$ s)で2台のE3729と将来設置のRF電子銃用クライストロンを駆動する。TH2436の電源にはBEHLKE社製のMOS-FETモジュールをスイッチとして用いた。

### 6. SHB系

SHBはSUS材で製作しているのでシャントインピーダンスが低く、そのためRF出力も15kWの高出力が要求される。クライストロンにはUHFの放送機用の東芝1AV88Rを用いた。パルス成形にはMOSFETによる半導体スイッチを用いた。クライストロンの駆動には5WのC級トランジスタアンプを用いた。

表3 SHB用電源のパラメータ

高周波周波数(MHz)	714
パルス幅( $\mu$ s)	2, 15, 30
高周波出力(kW)	15
パルス繰り返し(Hz)	10
カソード電圧(kV)	16.5
カソード電流(A)	2.1

### 7. 伝送系

導波管はSF6にて加圧した。RF位相の安定化のために、温調水で冷却している。さらに移相器はパルスモータ駆

動とし、再現性及び設定精度を向上させた。

### 8. まとめ

これらの機器は現在製作中である。Sバンドの電源は開発要素も多いので、10月に日新電機の工場にて組み合わせ試験を実施し、事前に性能検証を行う予定である。12月よりFEL研の新建屋に据え付け予定である。

### 9. 謝辞

FEL研のRFシステムの検討・設計・製作に関して下記の方々に御指導御協力をいただきました。クライストロンE3729と1AV88Rについて(株)東芝の米澤宏氏、Sバンドクライストロン電源について日新電機(株)の宮井裕三氏、大下英次氏、伊藤勲氏、Sバンドの駆動用高周波源について(株)ダイヘンの三宅修治氏と(株)日本高周波の松本博文氏、SHB電源についてパルス電子技術(株)の油浦守正氏、リニアック本体について三菱電機(株)の鈴木敏允氏、西原進氏にお世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。

### 10. 参考文献

- [1] R.J.Bakker, "Free Electrons as a versatile source of coherent radiation." Doctorial Thesis in FELIX 1993.
- [2] B.J.H.Meddens "A 50MW pulse forming network with a voltage stability within 0.03%" The FELIX project report 1992.
- [3] T.Tomimasu "FEL研電子リニアックと赤外-紫外域FEL施設" in this proceedings

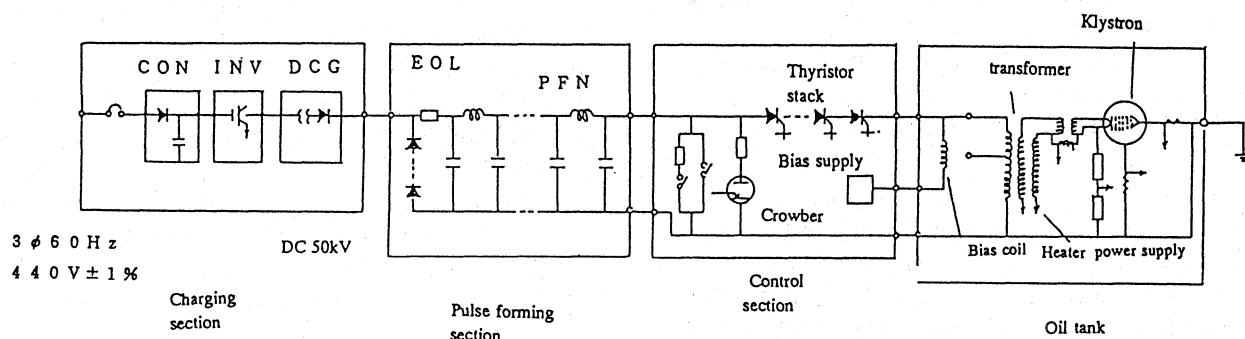


図3 クライストロンパルス電源装置の構成

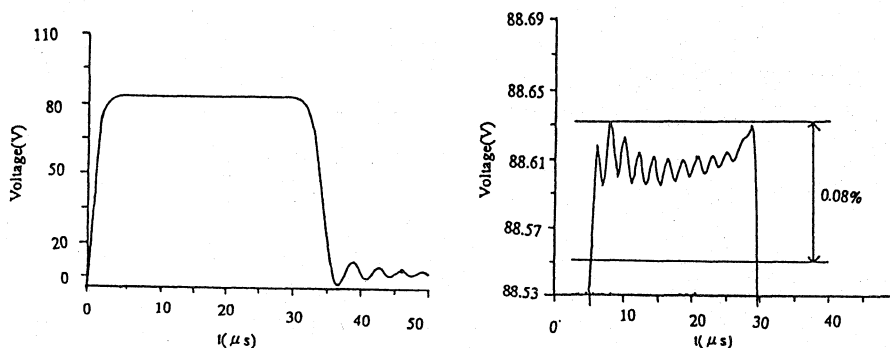


図4 モード1のパルス波形の計算結果