

FELI ELECTRON LINAC AND IR~UV-FEL FACILITIES

T. Tomimasu, Y. Morii, A. Koga, Y. Miyauchi, T. Keishi, E. Nishimura,
 K. Saeki, S. Abe, S. Sato, A. Kobayashi, I. Bessho and A. Nagai
 Free Electron Laser Research Institute, Inc. (FELI)
 2-7-4 Kyomachibori, Nishi-ku, Osaka 550

ABSTRACT

FELI is aiming at IR-FEL generation by the end of 1994 using a 75-MeV beam and a 3-m long undulator and UV-FEL generation by the end of 1996 using a 165-MeV beam and a 3-m long undulator. The linac is composed of a 5-MeV electron injector and seven ETL type accelerating waveguides with a length of 2.93 m ($2\pi/3$ mode, linearly tapered type). The injector consists of a 150-kV DC thermoionic triode gun operated by a 178.5-MHz, 500-ps pulser, a 714-MHz prebuncher (SHB), and a 2856-MHz standing wave type buncher (SWB). The linac will be operated in three modes of $24\mu\text{s}$, $12.5\mu\text{s}$ and $0.5\mu\text{s}$. With a choice of three modes, the maximum accelerated energy can be changed from 165 MeV to 310 MeV.

The linac beam will be sent to four undulators using S-type BT systems installed at 30-MeV, 75-MeV, 120-MeV, and 165-MeV sections at $24\mu\text{s}$ rf pulse operation. The ratio of the cavity length to the undulator length is designed to be less than 3. The beam, once used for lasing at 30-MeV section or at 75-MeV section, can be bent back to the following accelerating waveguide and is reaccelerated and reused for lasing.

FEL 研電子リニアックと赤外-紫外域 FEL 施設

1. はじめに

紫外域 FEL 発生に適した電子加速器として電子リニアックと電子蓄積リングがあるが、それぞれに欠点があり、それらを克服する提案がなされてきた。電子リニアックの場合では、電子ビームのエミッタンス ϵ とエネルギー幅が大きく、短波長になるほど FEL 波長 λ_R との関係 $\epsilon < \lambda_R / \sqrt{2\pi}$ を満たすのが難しくなる。したがって、いかにして電子銃で低エミッタンスの大電流・長パルスビームを発生させ、プリバンチャー、バンチャー、加速管と密度変調と加速をしながら、エミッタンス ϵ とエネルギー幅 ($\Delta E/E$) を大きくしないで電子ビームのバンチ化と高エネルギー化を達成するかである。

電子蓄積リングの場合では、もともと電子ビームの ϵ と $\Delta E/E$ は小さいので、これらをあまり大きくしないで、いかにして大電流を長寿命で蓄積できるかにかかっている [1]。ここでは、これらのことを考慮して設計した FEL 研の 5MeV 電子入射器を含む電子リニアックと FEL 施設について述べる。

2. 5MeV 電子入射器

図 1 に 5MeV 電子入射器の平面図を示す。電子銃には、 $24\mu\text{s}$ の長パルスビーム発生が可能ということで熱陰極三極管型 (EIMAC Y646B) を用いる。

電子銃は、大気中で使用できるように DC120kV 印加

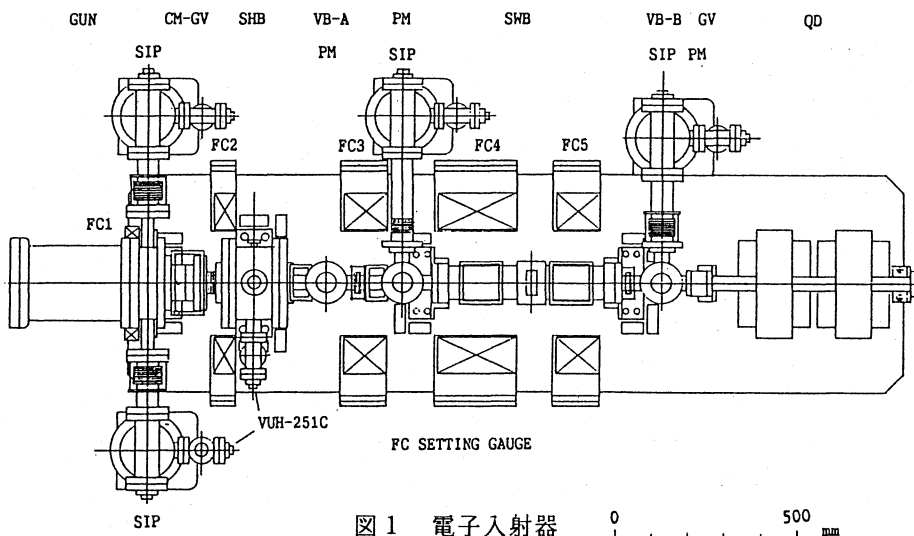


図 1 電子入射器

でKentech Instruments社製のパルス幅500ps以下、パルス電圧140V以上の178.5MHzグリッドパルサーで駆動される。CLIOやFELIXのデータから1パルス当たり1.2nC、ビームエミッタンス $5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ のビーム出力を期待している[2,3]。電子銃アセンブリーは、ICF253で装着できるようにし、できるだけ軽量化をはかる。

714MHzプリバンチャーは、リエントラント型のサブハーモニックバンチャー(SHB)で、電子銃からのサブナノ秒パルス電流によって誘起されるrf場の影響を小さくするためステンレス製である。714MHzのrf周波数は以下の理由から選んだ。1)できるだけrf空胴を小さくするため、電極フランジをICF253で、空胴長を20cm程度にする。2)電子銃からの極短パルス(<500ps)ビーム長は714MHzの 130° 以下に相当し、速度変調もうまくやれる。3)マイクロパルスビームと2856MHz/2°の周波数で発生する在来のマイクロパルスレーザと同期できる。

バンチャーは定在波型のバンチャー(SWB)で、9空胴である。ピーク電界は2MW rf入力に対して約10MV/mになる。小rf電力で高ピーク電界が得られるのが定在波型バンチャーの利点であるが、ディスク口径が10mmφ近くで、進行波型のディスク口径20mmと比べて小さいので電子ビームの集束と位置調整に注意が必要である。そのためSHB-SWB間のドリフトスペースには蛍光板型とボタンモニター型の位置モニターをそれぞれ2カ所に設置できるようにした。また、電子ビームの空胴電荷効果によるエミッタンス増加をできるだけ小さくするために、電子銃カソードからSWBの第1空胴までの距離を80cm以下にするように工夫した。図1の電子銃とSHBの間のCM-GVは、パルス電子社製のCMと岸川バルブ社製のGVを一つにして全長106mmにしたのも工夫の一つである。

電子銃カソードからSHB第1空胴までの約80cmの間、カソードから引き出された電子ビームは、まずウエネルトーアノード間の電界で集束される。図1に示したFC1~FC5は集束コイルで、FC1はカソードでの磁界を零にするためのもので、FC2, FC3, FC4で電子ビームは3mmφ以下に絞れるようにKapchinsky-Vladimirsky方程式[4]からそれぞれのアンペーターターンを決めた。図2にビーム軸に沿った磁界分布を示した。電子ビームのエネルギーが5MeV以下の場合にビーム半径rを一定に保つ磁界BsはK-V方程式から次式で与えられる。

$$Bs = 2\sqrt{2} m_0 c / (e\sqrt{Ia}) \cdot \sqrt{I/\beta} \gamma / r \quad (1)$$

$$Bs(T) = 3.69 \times 10^{-3} \sqrt{I(A)} / \beta \gamma / r(m)$$

ここで、 m_0 は電子の静止質量、 c は光速、 Ia はアルフィン電流(~17000A)、 I はビームのピーク電流、 $B=v/c$ 、 γ はローレンツ因子である。最大磁界はSWBの近くで0.19Tになる。表1に電子入射器の主なパラメータを示した。

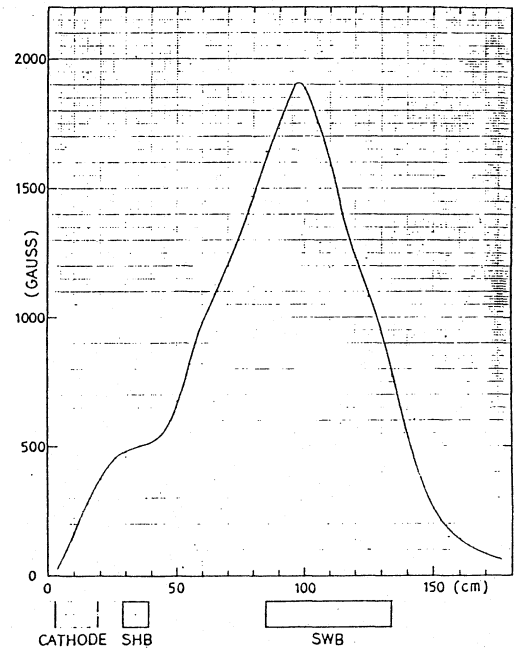


図2 磁界分布

表1 電子入射器の主なパラメータ

Gun	Type	Thermionic triode
	Energy	$\leq 150 \text{ keV}$
	Micropulse	0.4~0.5 ns
	Microcharge	1.2 nC
	Normalized emittance	$< 10 \pi \text{ mm mrad}$
	Macropulse	$\leq 24 \mu\text{s}$
	Repetition frequency	1~10 Hz
Prebuncher	Type	Re-entrant cavity
	Frequency	714 MHz
	Q-Value	~2000
	Peak field	~50 kV
Buncher	Type	Standing wave
	Length	~49 cm
	Energy	~5 MeV for 2-MW rf
	Energy spread (FWHM)	$< 130 \text{ keV}$

3. 電子リニアックのレギュラー部とFEL施設

電子リニアックのレギュラー部は、7本の電総研型加速管($2\pi/3$ モード、ディスク口径定勾配変化型、2.93m長)[5]から構成される。各加速管前後にはステアリングコイル、四重極電磁石、蛍光板型とコアモニター型のビーム検出器、スパッタイオンポンプが配列される。電子リニアックの全長はアンジュレタへのBT系も含めて46mである。バンチャーと7本の加速管には2本のE3729型クライストロン(2856MHz、全rfパワー48MW、 $24 \mu\text{s}$ パルス長)からrfパワーが供給される。図3には、SHB用1AV88R型クライストロンと2本のE3729型クラ

イストロンを含むrf系、電子銃から加速管先端までの電子リニアックの配列、4台のアンジュレータとBT系の配列の概略を示した。

ここで使用されるクライストロンは東芝製クライストロンE3712の改良型で、通常 $4\mu\text{s}$ -80MW、50ppsで使用されているものを $24\mu\text{s}$ の長パルス運転用として改良しテスト中のものである。電子リニアックは、図3にも示したように、1) $24\mu\text{s}$ モード、2) $12.5\mu\text{s}$ モード、3) $0.5\mu\text{s}$ モードの各モードで運転可能である。1)の $24\mu\text{s}$ モードは可視-紫外域FEL発生用、2)の $12.5\mu\text{s}$ モードは赤外域FEL発生や陽電子発生用、3)の $0.5\mu\text{s}$ モードは将来の電子蓄積リングへの入射や陽電子発生用である。三つのモードを選択することにより電子リニアックの最大加速エネルギーは165MeVから310 MeVまで変えられる。

E3729型クライストロンのモジュレータ電源は、440V MG、DC化電源、4並列のPFN回路、30段からなる光サイリスタスイッチ、1:15パルストランスから構成される。クライストロンカソード電圧の安定度はクライストロンrf出力の安定度を0.2%以下に保つために0.08%以下に抑える必要がある。FEL研のrfシステムについては、同じ研究会で森井らによって詳細な報告があるので参照されたい[6]。

図4に電子リニアック用のBT系、4台のアンジュレータ用のBT系と赤外~紫外域FEL施設、将来のSR-FELプロジェクト用として0.8GeV蓄積リングの配列を示した。電子リニアック用BT系は平均して2m毎に1対の四重極電磁石が配列され、電子入射器からリニアックの先端まで加速ビームのエミッタンスを大きくくしないようにしながら加速管の軸に沿って輸送できる。

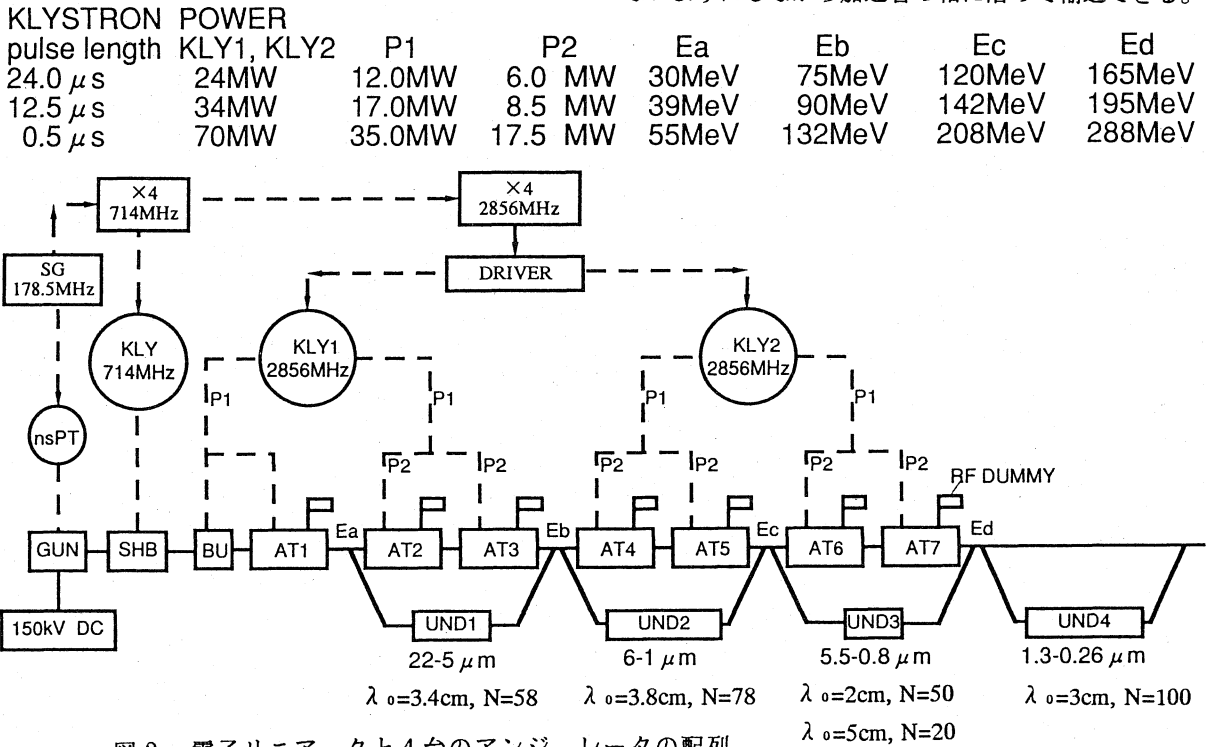


図3 電子リニアックと4台のアンジュレータの配列

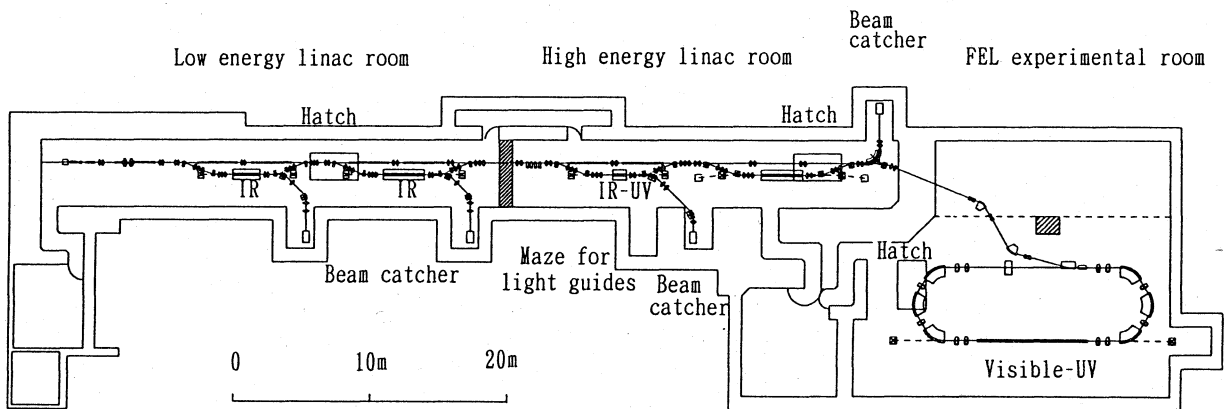


図4 赤外~紫外域FEL施設と将来のSR-FELプロジェクト用0.8GeV蓄積リングの配列

4台のアンジュレータに対応して4式のBT系が設計された。各BT系は、アクロマティックでほぼアイソクロナスなBT系(22.5° 偏向x2)である。運動量幅($\Delta P/P \approx \Delta E/E$)をもったビームが半径R、偏向角 α の偏向によってデバンチ化されるが、その程度 $c \Delta t$ は $\alpha^3 R \Delta P/P$ に比例する。22.5°の偏向角は、エネルギー幅0.5%の電子ビームが2つのBT系(22.5° 偏向x4)を通過しても Δt が0.6ps程度であるということを決められた。

光共振器のアンジュレータ長に対する比は、CLIO、FELIXなどのように2.5前後にする予定であったが、BT系の偏向角を22.5°としたため、ミラー真空槽のスペースがとれなくなり、光共振器長を少し長くして比を3.0にした。アンジュレータ長Lはレーリ長 Z_R と同じ程度とする。

4台の光共振器からのFEL出力は光ガイドを通して1階加速器室南壁側に設けた光ガイド用迷路室に導かれ、それから真上にある3階の4つの利用実験室へ導かれる。FELの平均出力は電子ビーム出力 $P_e \times$ エネルギー幅 $\Delta E/E \times 1/2$ を予定しており、それぞれの波長域でのFELの応用研究とともに表2に示した。

表2 FEL発振に必要なビームの質とFELの応用

Electron energy	$\leq 30\text{MeV}$	$\leq 75\text{MeV}$	$\leq 120\text{MeV}$	$\leq 165\text{MeV}$
Peak current	$\geq 100\text{ A}$			
Normalized emittance	$\leq 10\pi\text{ mm mrad}$			
Energy spread (FWHM)	$\leq 0.3\%$			
Micropulse duration	$\leq 5\text{ ps}$			
Micropulse repetition frequency	178.5 MHz			
Macropulse duration	$\leq 24\ \mu\text{s}$			
Macropulse repetition frequency	$\leq 10\text{ Hz}$			
Average beam power	$< 3.06\text{ kW}$			
FEL wavelength	20-7 μm	$\geq 1.5\mu\text{m}$	$\geq 0.54\mu\text{m}$	$\geq 0.25\mu\text{m}$
FEL average power	3 W	8 W	12 W	5 W
FEL applications	Separation FEL-CT Purification Photosynthesis			

30MeV BT系と75MeV BT系のアンジュレータUND1, UND2を通過してFELを発生したビームは、それぞれ次の加速管(AT4+AT5)と(AT6+AT7)に導かれ、再加速されるが、スペクトル幅の狭いFEL発生場合にはビームのエネルギー損失 $\Delta E/E$ は1%以下であり、BT系での偏向によるデバンチも先に述べた程度でビームのバンチ長 $\sim 5\text{ps}$ と比べて許容できる程度である。再加速されたビームは、次のアンジュレータUD3またはUD4で再びFELを発生し、さらにまた偏向されて蓄積リングへの入射や陽電子の発生に使用される。

FEL研BT系のラティス設計は、同じ研究会で宮内らによる詳細な報告があるので参照されたい[7]。表2はFEL発振に必要なビームの質とFEL研で予定しているFEL応用の例を示す。

4. 謝辞

電子入射器、加速管系については三菱電機(株)の鈴木敏允氏、西原進氏、クライストロンE3729と1AV88Rについては(株)東芝の米澤宏氏、長パルス・クライストロン変調器については日新電機(株)の宮井裕三氏、大下英次氏、伊藤勲氏、駆動用rf源については(株)ダイヘンの三宅修治氏と日本高周波(株)の松本博文氏、SHB電源についてはパルス電子技術(株)の油浦守正氏の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

5. 参考文献

- [1] T. Tomimasu, et al., Proc. HEACC'92 (Hamburg, July 20-24, 1992) p.1133
- [2] R. Chaput, Proc. EPAC'90 (Nice, France) p.544
- [3] R. J. Bakker, et al., Nucl. Instr. Meth. A307, 543 (1991)
- [4] J. D. Lawson, In Advances in Electronics and Electron Physics 13C, ed. A. Spetier (Academic Press, New York, 1983)
- [5] T. Tomimasu, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28(3), 3523 (1981)
- [6] 森井他, "The RF System of FELI" in this proceedings
- [7] 宮内他, "Lattice Design of the BT System of FELI" in this proceedings