

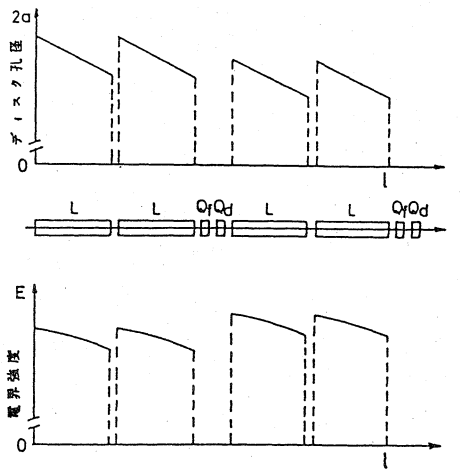
Developments of electron linacs including klystrons, synchrotron orbital radiation (SOR) facilities and free electron laser (FEL) sources in these thirty-five years are briefly reviewed. The low emittance beam acceleration and storage using electron linacs and storage rings are discussed for the future UV-FEL projects.

1. 電子リニアックとクライストロン、その開発と課題

表1に、ここ35年に行われた電子リニアックとクライストロンの開発と関連施設をまとめてみた。図1に示すような多段加速に使用する加速管の改良とビーム集束用四重極ダブレット（またはトリプレット）の配列によって、BBU発生をおさえながら、どこまで低エミッタンス・長パルス大電流ビームを加速できるかが今後の大きな課題である。Sバンド・パルスクライストロンの開発では20 μ sec、30MW以上の長パルス高出力化が、紫外域自由電子レーザー用電子リニアック開発において不可欠となっている。

表1 ここ三十数年における電子リニアックとクライストロンの開発と関連施設

年代	電子リニアック	クライストロン	使用目的	施設
1956~60	~10MeV	数MW(35%)	放射線利用 入射器	名工試、東大核研
61~65	10~30MeV		”	大放研、電総研
66~70	300MeV(90mA) BBU現象 大出力化(数十kW)	高出力化 20MW(40%)	原子核実験 放射線利用 中性子	東北大、STANFORD、 京大炉、広大、 NBS、MIT、SACLAY
71~75	大出力化(数十kW)		”	原研東海、北大工
76~80	極短パルス大電流化		放射線化学	阪大産研、東大原施
	高エネルギー大電流化 300MeV(240mA)	高効率化 25.8MW(49%)	放射線利用 リングへの入射	電総研
81~85	1.8GeV(300mA) DAW型定在波加速管	高出力化	リングへの入射	KEK 日大
86~90	高電界加速(20MV/m) 低エミッタンス・ビーム加速	高出力化(100MW)		阪大産研、KEK ソルテック
91~ (今後の 課題)	超伝導化 低エミッタンス・ 長パルス大電流ビーム加速	長パルス高出力 (20 μ 、30MW)	FEL リニア・ユライ ダー	原研東海、東大原施 FEL研、KEK



linearly tapered type (ETL type)

図1 BBU発生をおさえるための加速管構造と四重極電磁石の配列の例

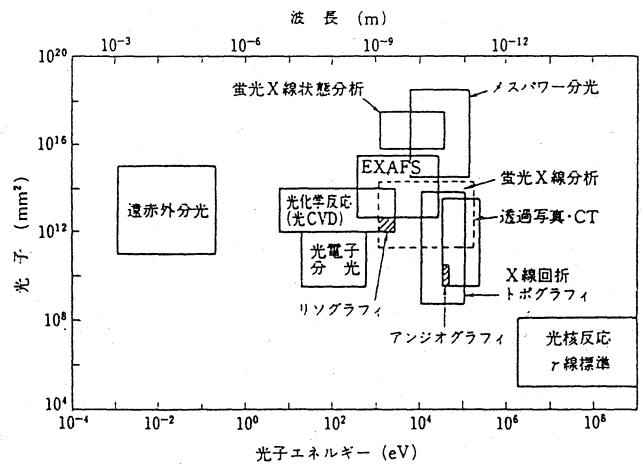


図2 SRの応用分野で必要とするおおよその光子エネルギーと光子数

2. 放射光源施設、その現状と課題

2.1 放射光施設の現状とSOR応用

現在までに稼動した放射光源の数は、世界で45台(18台)(カッコ内は国内の台数)、建設中のものが17台(2台)、計画中のものが分かっているもので14台(7台)ある。稼動した放射光源の4割が日本にあり、特にこの5年間では、世界で倍増、国内では約4倍になった。建設中、計画中のものも含めると、1GeV以下が34台(16台)、1GeV～3GeVが28台(8台)、3GeV以上が14台(3台)となる。1GeV以下の34台のうち、リソグラフィ専用は12台だが、日本にはすでにリソグラフィ専用のものが7台、自由電子レーザー専用(NIJI-IV)のものが1台、円偏光放射専用(NIJI-II)のものが1台ある。また、世界の1～3GeVの中型リングは計画中のものも含めて28台あり、日本の中型光源は計画中のものが東北大、広島大、大阪府など6台あるが稼動中ものものはPFのみである。

図2は、SRの応用分野で必要とするおおよその光子エネルギーと光子数を示す。利用分野が多い光子エネルギー域は10eV～100keVの広範囲にわたっているので、一台のリングで全エネルギー域にわたって高強度のSRを発生することは困難であり、1GeV以下の小型リングで10eV～1keV、1～3GeVの中型リングで100eV～10keV、3GeV以上の大型リングで1keV～100keVをカバーするのが得策である。

2.2 蓄積電流の大電流・長寿命化

2.2.1 蓄積電流の減衰理論と減衰モード

蓄積リングの真空槽内面の枯れが十分でない頃や、利用者がSR用ビームラインを使い始めた頃は、蓄積電流の減衰の様は千変万化であり、従来の時間 t -電流 I の関係を表わす(t, I)表示では、その減衰の原因を知る手がかりが得られない。しかし、図3のように蓄積電流と電流の減衰率の関係を($I, dI/dt$)表示で表わすと、その減衰の変化に対応して、真空槽内壁からのガス放出によるほぼ電流の二乗に比例して減衰するモード(減衰モードI)か、停滞ガスの局在による電流に比例して減衰するモード(減衰モードII)かを示せる。

図3は、電流減衰率表示と蓄積電流 I と真空槽内のガス圧力 P (全周長にわたってほぼ一様の場合)との関係から、SRによる真空槽内壁からのガス放出や残留ガスによる電流の減衰率成分を求められ、ガス放出などを評価できることを示したものである。すなわち、電子

の量子寿命が非常に長い場合には、我々が導いた電流減衰理論では、軌道を周回している電子バンチの体積Vが I^n に比例するとすると、蓄積電流の減衰率は次式で表わされ、

$$-dI/dt = aI^{2-n} + bI^2 + cI \quad (1)$$

第一項の電子-電子散乱による(タウシエク効果)減衰率成分、第二項の真空槽内面からの放出ガスによるもの、第三項の定常的な残留ガスによるものの和で表わされるので、電流減衰の原因を容易に推定できる。これによって、真空槽の内面処理とラテイスの選択による蓄積電流の大電流・長寿命化の見通しが可能となった。

2.2.2 真空槽の内面処理とラテイスの選択で蓄積電流1A級のリングの実現を

図4は、真空槽内面の粗さと零電流時の残留ガス圧の関係を示す。TERASの真空槽は、11年前作られたもので、内面はGB処理である。SORTECの真空槽は、3年前作られたもので、内面は電解研磨処理である。内面の粗さで、ほぼ2桁、残留ガス圧で、ほぼ1桁の差があり、この1桁の差は、(1)式のbとcがそれぞれ1桁小さい値であることを意味し、TERASとSORTECの電流減衰率の1桁の差を良く説明することができる。図4のRIKENのデータは、蓄積リング

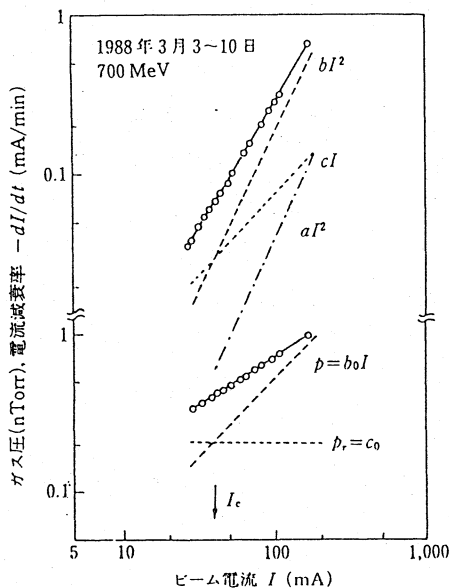


図3 電流減衰率とガス放出、残留ガス、タウシエク効果による減衰率成分。 a^2 と cI の成分は真空圧成分 $b_0 I_0$ と C_0 から決定される。

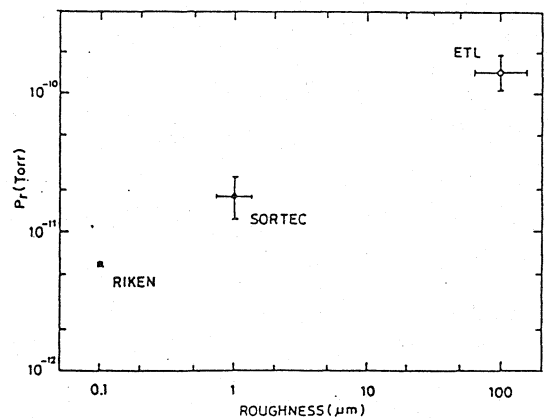


図4 真空槽内面の粗さと残留ガス圧との関係

の真空槽ではなくテストチェンバーのデータであるが、残留ガス圧はSORTECのデータより0.5桁低い。このことから、真空槽内面処理によって、残留ガス圧を 5×10^{-12} Torrにできれば、1GeV以上の電子ビームで特に低エミッタンスにしなければ、すなわちラテイスの選択によってタウシエク効果〔(1)式のaの値〕を小さくできるので、ソルテックの1GeVリングの実例から電流寿命は200mAで150時間、1Aで数時間程度まで伸びる可能性がある。

2.3 挿入光源型小型リングが普及するか?

超LSI産業の成長とともに光リソグラフィの進歩があまりにも急速で、今のところ256MビットDRAMの量産もエキシマレーザーを用いる位相シフトリソグラフィで検討されている。SRリソグラフィの出番は1G~4GビットDRAM用として1995年以後となる。

水銀ランプによる光露光に比べてSR露光は2桁以上高価になるが、最近注目されている指向性の良いSR X線による心臓毛細血管撮影(angiology)では、1回の撮影時間が数分程度ですむならば、たとえリングの規模が2GeV級と多少大きくなり、超伝導ウイグラを用いても光源費用が1時間30,000円程度であれば負担は小さくなる。

アンジオグラフィとともに注目され始めたFELは、SRが連続スペクトルを持つのに対して、単色で波長可変という優れた特性を持ち、蓄積リングや電子リニアックを用いて紫外域のFELを発生できるならば選択的に化学反応を制御できるため、新しい化学産業用光源として期待されている。図5は、既存または建設中の主な蓄積リングの直線部の長さ L_s が周長 C に占める割合と周長の関係を示したものである。今後は、図6の左上部に位置するNIJI-II、IVのようにFELや偏光SR、34keV X線の発生に光クライストロンや偏光アンジュレータ、X線ウイグラを設置できるような L_s/C が大きく、 C が小さい挿入光源型小型リングが多く建設されるだろう。

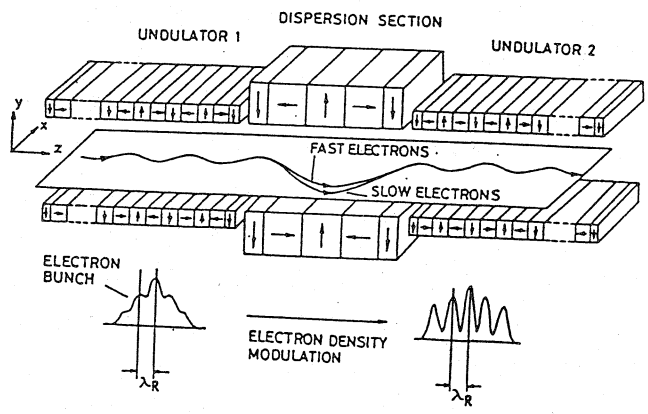
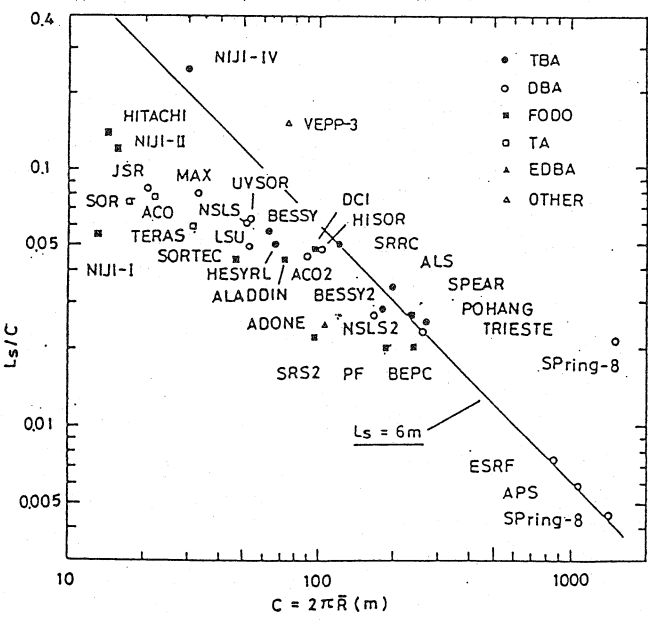


図6 光クライストロン中での電子軌道と FEL波長間隔の密度変調

図5 主な蓄積リングの直線部 L_s が周長 C に占める割合と周長 C との関係

3. 短波長FEL研究の現状と展望

3.1 高速電子によるコヒーレント単色光の発生

FELの発生には、高速電子によって発生する光の波長と方向を揃え、さらにその位相を揃える必要がある。それには、図6のような2つのアンジュレータと偏向部から構成される光クライストロンによって、高速電子が磁界と同じ周期長 λ_0 をもつ周期数 N の正弦波状運動をしながら進行方向に放射するSORが干渉しあつて方向が揃った単色光を発生し、単色光の中心軸成分が低損失の2枚のミラーで構成された光共振器内で往復するごとに、同期して光共振器を通過する電子ビームとの相互作用を強めて誘導放射をおこす必要がある。短波長FELによって光化学反応の高効率化や制御が可能になるが、FEL発生の特長は波長の $3/2$ 乗に比例するので短波長化とともにFEL発生は困難になる。FEL波長 λ_R は電子がアンジュレータで1周期の蛇行をする間の光と電子の走行距離の差で決まる。

$$\lambda_R = \lambda_0(1+K^2/2)/(2\gamma^2) \quad (2)$$

ここで、 $K=93.4 Bw(T) \cdot \lambda_0(m)$ で、 $Bw(T)$ は周期磁界のピーク値、 γ はローレンツ因子である。図6に示す光クライストロンによって電子ビームが蛇行するとき、0.1%程度のエネルギー広がりを持った電子ビームのうち低エネルギーの電子は遠回りをするため電子群は波長 λ_R の間隔で密度変調が進行し、図6右下のように λ_R の間隔でマイクロバンチされた高速電子が蛇行するとき放射するSRのうち波長 λ_R の光は、方向と位相が揃うのでコヒーレント光となる。したがって、マイクロバンチ中の電子数を N とすると、コヒーレント光の強度は

N^2 倍となる。1989年東北大で検証されたコヒーレントSORは、電子リニアックのバンチビームが発生するコヒーレント放射である。電総研では、リニアックの共振高周波の2波長の整数分の一の周期長のアンジュレータを試作し、コヒーレント・アンジュレータ放射の発生を計画している。

3.2 短波長FEL研究の現状

最初にFEL発振に成功したのはスタンフォード大の Madey 達で、1976年から1977年にかけて超伝導の電子リニアックとヘリカル・ウイグラを用いて、 $10.6 \mu\text{m}$ での増幅実験と $3.4 \mu\text{m}$ での発振実験に成功した。 $0.64 \mu\text{m}$ での可視域 FEL発振は、電子蓄積リング ACOと 1.3m 長光クライストロンを用いた南パリ大とスタンフォード大の連合チームによって、1983年に達成された。

電子リニアックを用いた可視域FELの発振例は2件あり、TRW社・スタンフォード大のチームは、1983年に常伝導電子リニアックを用いて $1.6 \mu\text{m}$ 波長で、さらに 1987年にはリサーチキュレーションで電子エネルギーを 115MeV に上げて $0.52 \mu\text{m}$ での発振に成功した。Boeing Aerospace 社は 120MeV でピーク電流 300A 、パルス幅 $80 \mu\text{s}$ の電子リニアックと勾配付アンジュレータを用いて、 $0.6 \mu\text{m}$ の発振に成功した。

日本初の可視域FEL発振は、電総研でTERASリングと 1.47m 長光クライストロンを用いて1991年3月22日に達成された。図7は発振に伴うスペクトル変化を示す。

発振波長は 598nm 、電子エネルギーは 230MeV 、バンチ電流は 4mA であった。図7(a)は光クライストロン特有の自発放射光スペクトルで、(b)、(c)はスペクトルの一つのピークが発振によって370倍以上になっていることを示す。図8は、国内のFEL計画を図示したもので、直線は(2)式の波長 $\lambda_R(\text{m})$ と電子エネルギー $E(\text{MeV})$ との関係を示す。

紫外域FEL発振は、1988年にソ連ノボシビルスク研究所で蓄積リングVEPP-IIIの 350MeV 電子ビームを用いて $0.38 \mu\text{m}$ 波長で、1989年には $0.24 \mu\text{m}$ 波長で達成している。紫外域にのFEL開発は、ソ連の発振例のほか、米国のDuke大学の 1GeV リングやNISTの 1.85MeV マイクロトロンによる発振計画、電総研と川崎重工のNIJI-IVによる発振計画などがある。電総研では、

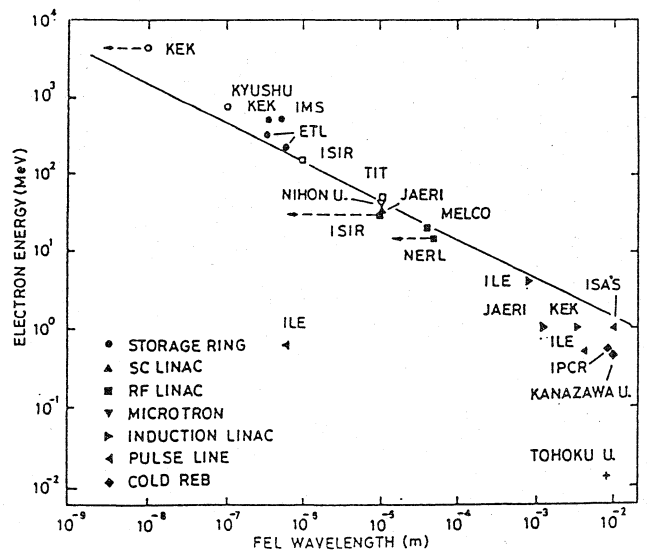
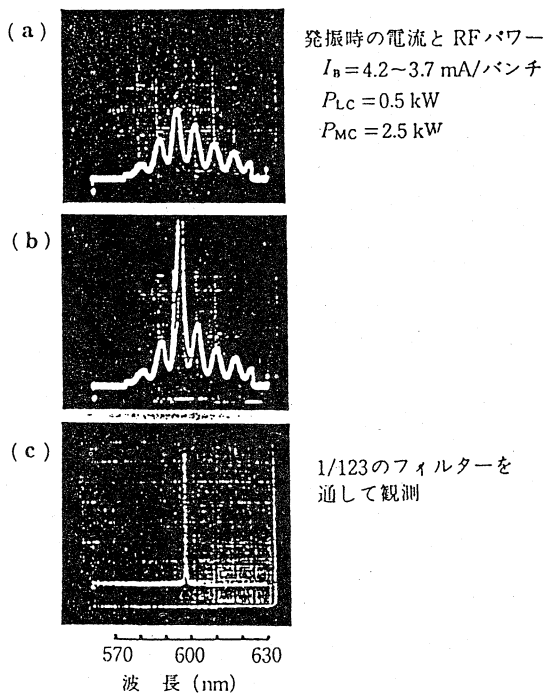


図8 国内のFELプロジェクトとFEL波長と電子エネルギーの関係

図7 レーザ発振に伴う出力光スペクトルの変化
 (a)は光クライストロン特有の自発放射光スペクトル。
 (b)、(c)は発振によるスペクトル変化を示す。

川崎重工と協力して図9に示すような7.2mの長直線部をもつ紫外域FEL用小型リングNIJI-IVをすでに完成し、現在約70mAを蓄積している。1992年度には6.3m長の光クライストロンを設置し、0.2~0.35 μ mのFELを発生させる予定である。

3.3 短波長FEL装置の開発課題、低エミッタンス・長パルス大電流ビーム加速

短波長FEL装置の開発には、1)高いFEL発生利得を得るため、エネルギーの揃った大電流・低エミッタンス・ビームの加速と高利得挿入光源、2)装置の小型化、3)光共振器用の低損失多層膜ミラー、などの開発が不可欠である。

3.3.1 大電流・低エミッタンス・ビームの加速

可視から紫外域のFEL発生が可能な電子加速器として、100MeV以上の電子蓄積リング、マイクロトロン、電子リニアックがあるが、これらの加速器で加速された数A以上の電子ビームは、FEL発生に要求される条件、エネルギー幅 $\Delta\gamma/\gamma < \gamma/(4N)$ 、ビームエミッタンス $\epsilon < \lambda_0/(4\gamma N)$ を満たすか、それに近いものでなければならない。

図10に、既設電子加速器の加速電流をパラメーターとした電子のエネルギー幅と電子ビームのエミッタンスの関係例を示す。電子蓄積リングの電子ビームは、今のところ電子リニアックのビームと比べて、エネルギー幅とエミッタンスが共に1~2桁小さくて質が良いので、蓄積リングが短波長FELの電子源として期待されている。電子リニアックによる電子加速は直線的加速であり、リング中の電子のようにSRを放出しないので、電子が光速近く

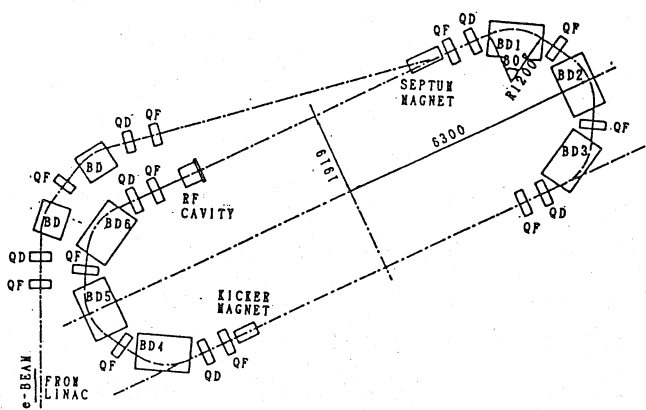


図9 FEL用小型リングNIJI-IVの構成図

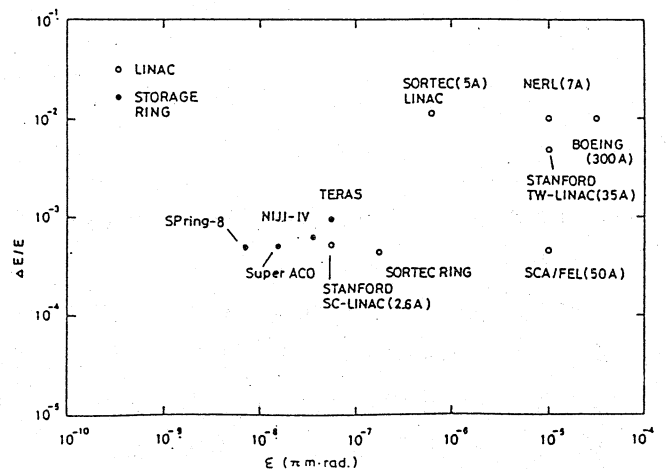


図10 加速電流をパラメーターとした電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスの関係例

まで加速されると電子ビームのエネルギー幅を小さくするような位相安定性がなく、 $\Delta\gamma/\gamma$ を0.1%程度にするにはできるだけ高エネルギーの大電流・低エミッタンス・ビームの入射と安定な高周波加速電界が必要になる。ほう化ランタンをカソードとする高周波電子銃(RF Gun)など電子銃の改良によって、初段での高電圧・大電流加速により100A以上でエネルギー幅0.5%以下、エミッタンスを 10^{-6} m \cdot rad以下にすることが一つの目標となる。

電子のエネルギー幅の方は、各電子が通過する場所と時刻における加速管の電界強度(一般に加速管軸を中心に加速管の半径方向の一様性は良くなく、ビームローディングによっても変化する)の不揃いによるので、エミッタンスの大きなビーム程、加速された電子のエネルギー幅は大きくなる。

短波長域でのFEL発振は、最近の電総研での598nmFEL発振も含めて5例と少なく、短波長FEL開発には、低エミッタンス・ビームの大電流加速が可能な小型電子リニアックや長直線部をもつ小型蓄積リング、高利得挿入光源、低損失多層膜ミラーの開発が必要なことを強調しておく。