電総研における蓄積リング自由電子レーザー発振実験

山崎鉄夫,山田家和勝,杉山 卓,大垣英明,冨増多喜夫, 野口 勉,三角智久,千脇光國,鈴木良一

電子技術総合研究所

1. はじめに

自由電子レーザー (free electron laser, FEL) については既に本誌に解説¹⁾や比較的新しい情報²⁾ が掲載されているうえに,文献1)に示したように 優れた解説も多い。本稿では,解説ではなく FELの発振技術を,電総研での経験を中心に述 べることにする。

電総研では数年来蓄積リング TERAS での可視 域 FELの研究を進めてきたが、本年2月に発振の 閾値に到達し、3月に598nm での発振に成功し た。発振時の蓄積ビーム電流はバンチ当り約 4mA,電子エネルギーは230MeVであった。短波 長になるほど、FELのゲインが下がり、発振が困 難になるため、国内では従来大阪大学や理化学研 究所等でmmの波長領域でのFELがみられている のみであったが、今回の成功によって一挙に可視 域に短波長化された。蓄積リングでの発振は、フ ランス Orsay の ACO と Super - ACO, ソ連 Novosibirsk の VEPP-3 に次ぐものであるが、 ACO は既に閉鎖され、VEPP-3 も近く別の用途 に転用される予定である。また、RFリニアックで は、アメリカの Stanford 大学の超伝導リニアック と Boeing社- Spectra Technology社において可視 域で発振している。

2. 実験の概要

電総研でのFEL実験配置を図1に示す。FELに おいては通常のレーザーと異って1パスで増幅す る増幅型や自発放出光自己増幅型等もあるが,図 の様に光を光共振器ミラーで多数回往復させてそ



Fig.1 Experimental arrangement for FEL oscillation at ETL storage ring TERAS.

(C) 1991 The Japanese Society for Synchrotron Radiation Research



Fig.2 Plan view of ETL storage ring TERAS.

の度に増幅させる方式は発振型と呼ばれている。 電総研では1986年に光クライストロンを試作し, 同年から蓄積リング TERAS において自発放出光 の発生とスペクトルの測定,光共振器,電子ビー ムの性質等の要素技術の研究を進め³⁰,1989年には FELゲインの測定に成功し,以降発振実験を行っ てきた⁴⁰。いずれも可視域では国内で最初のもので あった。発振型 FELの研究は大体この様な道筋を 辿る。蓄積リング TERAS については本誌でも紹 介されている⁵⁰が,図2にその平面図を示す。

3. 光クライストロン

蓄積リング TERAS は1981年に稼働開始したシ ンクロトロン放射の発生・利用を目的としたもの であり,直線部が1.8mと短くゲインが低いので, 図3に示す光クライストロン (optical klystron, OK)[®]を使用している。OKとは通常のアンジュ レータを2個置き,上流側をエネルギー変調用, 下流側をエネルギー変換用とし,中央に強い磁場 の分散部を設けてミクロなバンチングを強め,ゲ インを通常のアンジュレータの数倍まで高めよう とするものである。永久磁石は新稀土類永久磁石 (NEOMAX-35, Nd-B-Fe系,住友特殊金属社 製)を用いた。これは世界最初の試みであった が、以降この素材を用いたアンジュレータが従来 のSmCo_s以上に流行するようになった。OKの中 での電子軌道は図1の中に模式的に示されてい る。後で図9(a)に示す自発放出光のスペクトルの 微細構造は光クライストロン特有のもので、通常 のアンジュレータからのものはその包絡線の形を している。Madeyの定理^ηによれば、小信号・低 ゲイン領域ではFELゲインは自発放出光スペクト ルの勾配に比例するので、OKでは高いゲインが 期待できるわけである。FELの波長λは

$$\lambda = \lambda_0 (1 + K^2/2) / (2\gamma^2) , \qquad (1)$$

OKでのゲインは

$$G_{\text{oK}} = 1.12 \times 10^{-13} \times \lambda_0^2 (\text{N} + \text{N}_{\text{d}}) \,\text{N}^2 \gamma^{-3} \text{K}^2 [\text{JJ}]^2 \rho_0 \text{fF}$$

= 0.93 G₂₂ [(N+N_{\text{d}})/N] f (2)

で表される。ここに、 λ_0 は通常アンジュレータ部 の磁場周期長、Nはその周期数、N₄は分散部内で 光が電子を追い越す光の周期数、 γ は電子の全エ ネルギーをその静止質量 (m_0c^2) 単位で表したも



Fig.3 Structure of ETL optical klystron.

の、 ρ_0 は電子密度、Kはアンジュレータの偏光パ ラメータで、K=eB₀ $\lambda_0/(2\pi m_0 c)$ 、[JJ] =J₁(ξ) - J₀(ξ)、 ξ =K²/(4+2K²)、J_nはn次のベッセル 関数、eは単位電荷、Fは電子ビームと光ビーム の重畳因子、G_{2N}は2N周期の通常アンジュレー タによるゲインである。f=f₀f₇はゲイン劣化因数で あり、

$$f_{\tau} = \exp\left[-8\pi^{2} (N + N_{d})^{2} (\sigma_{\tau}/\gamma)^{2}\right]$$
(3)

は電子ビームのエネルギー幅 σ ,によるゲインの劣 化を表し、foはそれ以外に起因するものである が、後者は1に近い。電総研OKの場合、N=8、 N₄=74である。(2)式によれば、分散部磁場を強め る程ゲインが高くなるように見えるが、実は(3)式 のように電子ビームのエネルギー幅に非常に敏感 になるので、分散部のN₄値についてはビームの質 を考慮に入れた妥協が必要になる。従って、十分 に長い直線部を持つリングでは光クライストロン にしないほうが有利である。ちなみに、従来の蓄 積リング FELでは、Frascatio Adoneを除いて常 にOKが使用されてきた。

4. 光共振器

一般に短波長の FELでは FELゲインが非常に低 いので、光共振器での損失を極力小さく抑えなけ れば発振には至らない。従って、超低損失共振器 が必要になり、損失の測定が重要になる。電総研 では微小光共振器損失を減衰時間法
⁸⁾によって測定 しており,使用前のミラー1枚当りの損失は 30ppmの透過率を含めて 40ppm 程度である^{1.4})。 しかし、短波長領域でよく用いられる誘電体多層 膜ミラーは自発放出光の高調波成分の照射による 劣化が著しいので、電総研では損失のその場測定 も可能なシステムを完成させてこれをモニタして いる。図4は結果の一例であるが、照射量が増加 すると損失が増加し、損失が少い波長帯域が狭く なり、最適波長も長波長側にシフトしている。現 状では、損失が許容範囲を上回る度にミラーを交 換している。

蓄積電子ビームはバンチングしているので光も



Fig.4 Round - trip cavity loss vs. wavelength. E is the amount of exposure expressed by (stored current) × (integrated exposure time).

バンチ状になっている。この光のバンチが光共振 器を1往復した後次の電子バンチと重畳して電子 からエネルギーをもらい受けて増幅されるが、こ の増幅が多数回続くためには光共振器長が電子バ ンチ間隔の半分に正確に調整されている必要があ る。FELゲインが低い場合、通常のレーザーに比 べて非常に長い光共振器長を μ mオーダーの精度 で設定する必要があるが、発振条件を捜しながら いきなりこの精度で設定することは不可能に近 い。そこで、まず10 μ m程度の粗調整を行い、し かる後レーザー発振を観測しながら μ mオーダー に追い込んでいく必要がある。

電総研では,以下に述べるような粗調整の方法 を確立している。自発放出光を光共振器で共振さ せ,下流側のミラーから出てくる光を分光器を通 した後ストリーク・カメラで受けて,その時間構 造を観測する(図1参照)。共振器長が短すぎる と光のバンチは次第に電子バンチより前にずれて くるので出力パルス光は図5(b)の様に前に尾を引 き,長すぎると逆に後に尾を引く。光共振器長が チューンされると(a)の様に左右対称になり,パル ス幅も細くなる。従って,このパルス波形を観測 することによって共振器長を正確にチューニング することができる。時間の関数としての出力信号 の大きさ S(t) は

$$S(t) = \sum_{m=0}^{\infty} s(t-2m\delta) (1-P)^m$$
 (4)

で与えられる。ここにsは検出器の応答特性も含 めた電子バンチの時間構造, Pは1往復当りの共 振器損失,δは共振器長のデチューン,mは往復 回数である。従って,バンチ長が短く,共振器損 失が少ないほどこの方法の精度は高くなる。電総 研では現在±15μm程度の粗調整が可能である。

一方, ミラーの駆動については上記のような並 進はもちろんのこと, 共振器長が長いのでミラー の回転の精度も高くする必要がある。ミラーは超 高真空中にあるので精密な調整は非常に難しい が, 電総研ではステッピング・モーターとピエゾ 素子を併用した超高真空ミラー精密駆動装置を試 作した。駆動精度は 0.2 μ m以上である。通常, 蓄積リング FELではリングの加速周波数を微調整 してバンチ間隔を逆に光共振器長の 2 倍に合わせ ているが, リングの周長が変化したりするので多 少問題がある。電総研のシステムでは共振器長の 調整のみで十分である。

なお、レーザー・ビームと電子ビームの横方向 の重畳も重要で、光共振器のReyleigh長は通常ア ンジュレータ長程度が選ばれるが、もちろん電子 ビームの条件を考慮して決める必要がある。電総 研の光共振器長は5.238m、凹面鏡の曲率半径は 3m であり、従ってReyleigh長は1m である。

5. 電子ビーム

短波長の FEL では特に電子ビームの質が問題に なり,電総研でも蓄積ビームのエネルギー幅や3 次元のプロフィールの測定を行っていることは, 文献1)でも述べた。ここではそれ以降のことに ついて述べる。

TERASの通常運転では周長 31.45m 中に 18バ





Fig.5 Time structure of optical pulses after the output mirror. (a) almost tuned, and (b) detuned by - 30 μ m.

ンチのビームが回転している。一方光共振器長は 5.238mなので、光が1往復した時に次の電子バン チと重畳するためには3バンチのみが必要で、残 りのバンチは発振には不要である上に自発放出光 を発してミラーの劣化を促進する。そこで、電総 研では2段階のRF-KO (radiofrequency knock - out) 法を用いて、加速周波数を分周したものと ベータトロン周波数とを混合・増幅したRF電力 を図2のRF-KO電極に印加することによって3 バンチに落している⁹。図6は電子ビームのバンチ 時間構造を示したもので,上図のように全てのバ ンチに電子が詰まっていたものが第1段階の RF-KOで中央の図のように6バンチになり,第2段階 で下図のように3バンチになっている。2段階に 分けているのは,この様な正弦波そのものを用い る方法では節の隣のバンチが落ちにくいからであ る。

3バンチ・モードでは18バンチの場合よりバン チ間相互作用が弱いのでビームの質は多少良い が、まだまだエネルギー幅も広く、FELには適し



Fig.6 Electron - beam bunch structure (a) before the RF-KO (full bunches), (b) after the first-step RF-KO (6 bunches), and (c) after the second-step RF-KO (3 bunches).

ていないので、さらにビームを高品質化・安定化 する必要がある。電総研ではそのために2加速空 胴方式[™]の研究を行ってきた[™]。蓄積ビームには シンクロトロン振動と呼ばれる縦振動があり、バ ンチ間相互作用によって全バンチが共振するとこ れがビームの不安定性を誘起する。そこに高調波 の成分を与えるとシンクロトロン振動が速く減衰 して, ビームが安定化される。電総研では、図2 に示したようにリングの主加速空胴(171.62MHz) の2倍高調波 (343.24MHz)の Landau 加速空胴を 設置し、その電力、共鳴周波数、および位相を調 整することによって、主としてバンチ間相互作用 を制御している。図7にリングのビーム・モニタ からの信号の周波数スペクトルを示す。(a)は Landau加速空胴を動作させない場合のもので、中 央の周波数の他にビームの不安定性の指標となる サイドバンドが見られる。シンクロトロン周波数 は約80kHzで、縦軸は対数でとってあるのでピー クはそれほど高くないが6 重極までが現れてい る。Landau加速空胴を働かせて上記の調整を行う と(b)のようにサイドバンドがきれいに消える。こ の操作中に自発放出光スペクトルを観測している と、電子ビームのエネルギー幅が急速に狭くなる ことが明かにわかる。この様にして現在ではバン チ当り6mA以上の安定な3バンチのビームが得ら れるようになった。

バンチ間相互作用を抑制するには他にフィード バッグによる方法もあり¹¹⁰, 電総研でも研究が始 められている。なお, イオン・トラッピングによ る不安定性はイオン・クリアリング電極に高電圧 を印加することによって抑制している¹²⁰。

6. ゲイン測定

予測される FELゲインが光共振器損失より十分 に高い場合には必要はないが, TERAS での実験 ではゲインが低く発振ぎりぎりなので, 外部レー ザーによるゲイン測定が必要であった。測定法に ついては文献1)でも述べてある。電子エネルギーを



 $P_{LC} = 0 kW$ $I_B = 7.4 mA$



Fig.7 Frequency spectra of signal from a button monitor when the beam is (a) not stabilized and (b) stabilized. The scale of the abscissa is 100kHz/div.

10000

6.2 mA

I_R

変化させて測定したデータを図8(a)に示す^{1,4}。 バンチ当り1.6mAの蓄積電流で1×10⁻⁴程度のゲ インが得られている。これは上記の光共振器損失 を考えると発振ぎりぎりの線であるが、ゲインは 蓄積電流の増加と共に高くなる傾向か見られ、か っ電子ビームの質は現在ではこの当時より優れて いるので、蓄積電流が増加すれば発振は可能であ る。図8(b)は同時に測定した自発放出光スペクト ルであるが、前記の Madeyの定理が確認できる。

7. 発振実験

ゲイン測定である程度の発振の目処が立つと, いよいよ発振実験にとりかかる。

蓄積リング内の電子ビームは光クライストロン の中で光と相互作用してこれを増幅する。電総研 の場合,下流側ミラーからの出力光は図1のよう に分光器を通り,そのスペクトルは後におかれた 高感度フォトダイオード・アレイによって実時間 で測定される。電子ビームを安定化させた後共振 器や電子ビームの微調整を行うと,FELのゲイン が光共振器損失を上回れば,光のビームが共振器 内で往復運動をする度に成長してコヒーレントな レーザーになって発振する。出力光の一部はスト リーク・カメラに取り込まれ,共振器長調整やバ ンチ長測定に使用される。

図9(a)は発振前の自発放出光スペクトル,(b) と(c)は発振時のスペクトルを示しているが、(c) は測定装置の前にフィルタを置いて強度を約 1/120 に落したものである。この様な測定結果から, FELのピーク出力は10mW以上と推定されてい る。図9(b), (c)の発振スペクトルのピークは 598nmにあるが、(a)の自発放出光スペクトルより 幅が狭くなり(0.3nm程度),ピークは山と山の 間隔の約20%長波長側にシフトしている。前者は 光がコヒーレントになったためで、当然のことで ある。ピークのシフトは Madeyの定理によれば山 と山の間隔の25%になるはずであるが、多少それ からずれている。 ACO での実験でも同様な傾向が 見られたが、シフトはさらに小さくて15%であっ た¹³⁾。ACOのグループは、この Madeyの定理か らのずれを、共振した自発放出光の横方向電磁界 が TEM_m以外のモードも含んでいたためであろう と推測しているが、電総研の実験では自発放出光 の共振が TEM_mモードのみであることを事前に確 認している。何か別の理由がありそうな感じであ



Fig.8 (a)Typical peak - gain spectra and (b) spon - taneous - emission spectrum.

る。図10に電総研で得られた FEL のパターンを示 す。

3. 今後の展望

以上のように電総研では可視域での FELの発振 に成功したが,おそらくゲインがあまり高くない ことと調整か不十分なために長時間にわたる安定 な発振は得られていない。今後もQスイッチング 等の実験を続けて,より良いデータを得るべく努 力を重ねていく予定である。

TERASの様に直線部の短いリングでは、ゲイン が低いので飛躍的な短波長化は困難である。短波 長化の困難さは、(1)式と(2)式から明らかなよう に短波長なるほどゲインが低くなることに起因し ている。当所では、次の段階として長直線部が7m と長いFEL用小型リングNIJI-IVを川崎重工社と 協力して建設し¹⁴⁾,最近ビーム蓄積に成功してい る。このリングに設置する6.3mの光クライストロ ンも設計中で,可視から紫外,さらには真空紫外 へと短波長化の研究を進めていく予定である。 FELを考慮にいれた加速器の建設は、今後流行す るであろう。短波長化のためには、加速器のみな らずミラーの問題等多くの障害があるが、それら は着実に乗り越えられていくであろう。

国内では、アメリカ等の諸外国より研究の開始 が遅れたために FEL の研究は大きく水を開けられ



Fig.9 Output spectra of (a) spontaneous emission, (b) lasing, (c) lasing but with a filter in front of the monochromator.

ていたが,現在では原子力基盤技術総合的研究 (原子力基盤クロスオーバー研究:当所の他日本 原子力研究所,動力炉・核燃料開発事業団,理化 学研究所が参加)の枠組みの下で実施されている ものの他,大阪大学,東京大学等においてもFEL の研究が進められており,合計十指に余るプロジ ェクトが進行中である。さらに最近関西に自由電 子レーザー研究所も発足している。



Fig.10 FEL pattern at ETL.

FELの短波長化が進めばそれに応じて応用分野 が広がることは勿論,この領域での研究成果は長 波長領域での研究にもフィードバックされ,大出 力化・高品質化に大いに資することになり,中・ 長波長領域自由電子レーザーの応用分野も広がっ ていくものと期待される。

電総研における蓄積リング FELの研究は,昭和 63年度までは科学技術振興調整費,平成元年度か らは原子力試験研究費でリニアック・蓄積リン グ・グループの共同で研究が進められている。最 後に,2加速空胴方式について御指導頂いている 日本原子力研究所の宮原義一氏に感謝の意を表す る。

文献

- 山崎鉄夫:放射光,第2巻第3号, 19(1989);山崎鉄 夫:電子技術総合研究所彙報,54,704(1990).
- 2) 山崎鉄夫:放射光,3,185(1989).
- T. Yamazaki, T. Nakamura, T. Tomimasu, S. Sugiyama, and T. Noguchi: Proc. 3rd Japan China Joint Symp. Acc. for Nucl. Sci. and Their

Appl., Riken, p.81(1987); T. Nakamura, T. Yamazaki, T. Noguchi, S. Sugiyama, and T. Tomimasu: Proc. 6th Symp. on Acc. Sci. and Tech., Tokyo, p.262(1987).

- 4) T. Yamazaki: Proc. SPIE 1133, 62(1989); T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, T. Tomimasu, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, and H. Ohgaki: Proc. 2nd Int. Symp. Advanced Nucl. Energy Res. Evolution by Acc. -, JAERI, p.308(1990); K. Yamada, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Tomimasu, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, and H. Ohagaki: Proc. Tokyo Symp. '90 Free Electron Laser (1990) in press; ibid.: Nucl. Instr. Methods, A304, 86 (1991); T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Tomimasu, T. Noguchi, T. Mikado, M. Chiwaki, M. Chiwaki, A. Suzuki and R. Suzuki : ibid., to be published.
- 5) 富增多喜夫: 放射光, 第1巻第1号, 33(1989).
- N.A. Vinokurov and A.M. Skrinsky: INP77 59, Novosibirsk (1977).
- 7) J.M.J. Madey: Nuovo Cim. 50B, 64 (1979).
- J.M. Herbelin, J.A. McKay, M.A. Kwok, R.H. Ueunten, D.S. Urevig, D.J. Spencer, and D.J. Benard: Appl. Opt., 19, 144 (1980).
- 9) S. Sugiyama, T. Yamazaki, K. Yamada, T.

Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, H. Ohgaki, T. Nakamura, T. Tomimasu, Y. Miyahara, S. Sato, and H. Usami: TELL – TERAS Activity Report 1987~1990, Electrotech. Lab., p.71(1990).

- Y. Miyahara, S. Asaoka, A Mikuni, and K. Soda: Nucl. Instr. Meth., A260, 518 (1987).
- 11) T. Kasuga, M. Hasumoto, T. Kinoshita, and H. Yonehara: Japanese J. Appl. Phys., 27, 100(1988);
 T. Kasuga, H. Yonehara, M. Hasumoto, and T. Kinoshita: ibid., 27, 1976 (1988).
- 12) S. Sugiyama, T. Noguchi, T. Yamazaki, T. Nakamura, T. Mikado, M. Chiwaki, and T. Tomimasu: Proc. 6th Symp. on Acc. Sci. and Tech., Tokyo, p.285 (1987).
- M. Billardon, P. Elleaume, J.M. Ortega, C. Bazin,
 M. Bergher, M. Velghe, Y. Petroff, D.A.G.
 Deacon, K.E. Robinson, and J.M.J. Madey: Phys.
 Rev. Lett., 51, 1652 (1983);
- 14) T. Tomimasu, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Yamazaki, K. Yamada, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, S. Suse, M. Yoshiwa, and A. Iwata: Proc. 7th Symp. Acc. Sci. and Tech., Osaka Univ., p.347(1989); H. Ohgaki, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Mikado, R. Suzuki, and T. Tomimasu: ibid., p.284(1989).