

ETL LINAC FACILITY AND FREE-ELECTRON LASERS

T. YAMAZAKI, T. NOGUCHI, T. MIKADO, S. SUGIYAMA, K. YAMADA,
M. Chiwaki, H. OHGAKI, R. SUZUKI, and N. SEI

Electrotechnical Laboratory 1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305

ABSTRACT

An outline is presented of the recent development on the ETL (Electrotechnical Laboratory) electron-linac facility and storage-ring FELs (free-electron lasers). Some modifications including the injection system have been made to the linac. Four storage rings are working very well. The TERAS FEL system has been shut down after the successful oscillation around 590 nm. The new NIJI-IV FEL system has been proven to work well, and the current tunable wavelength range is over 100 nm (488~595 nm). Preparatory experiments on the FEL at shorter wavelength are underway.

電総研電子リニアック関連施設と自由電子レーザー

1. はじめに

電総研電子リニアック関連施設(図1)においては、1980年の500MeVリニアックの完成、1981年の800MeV蓄積リングTERASの完成以来、住友電工

TERAS

(株)、川崎重工(株)等の協力を得て3台の小型蓄積リングNIJIシリーズを完成させ、何れも順調に稼動している。リニアックに関しては、最近入射系やビーム輸送系に改造を加えている。一方、

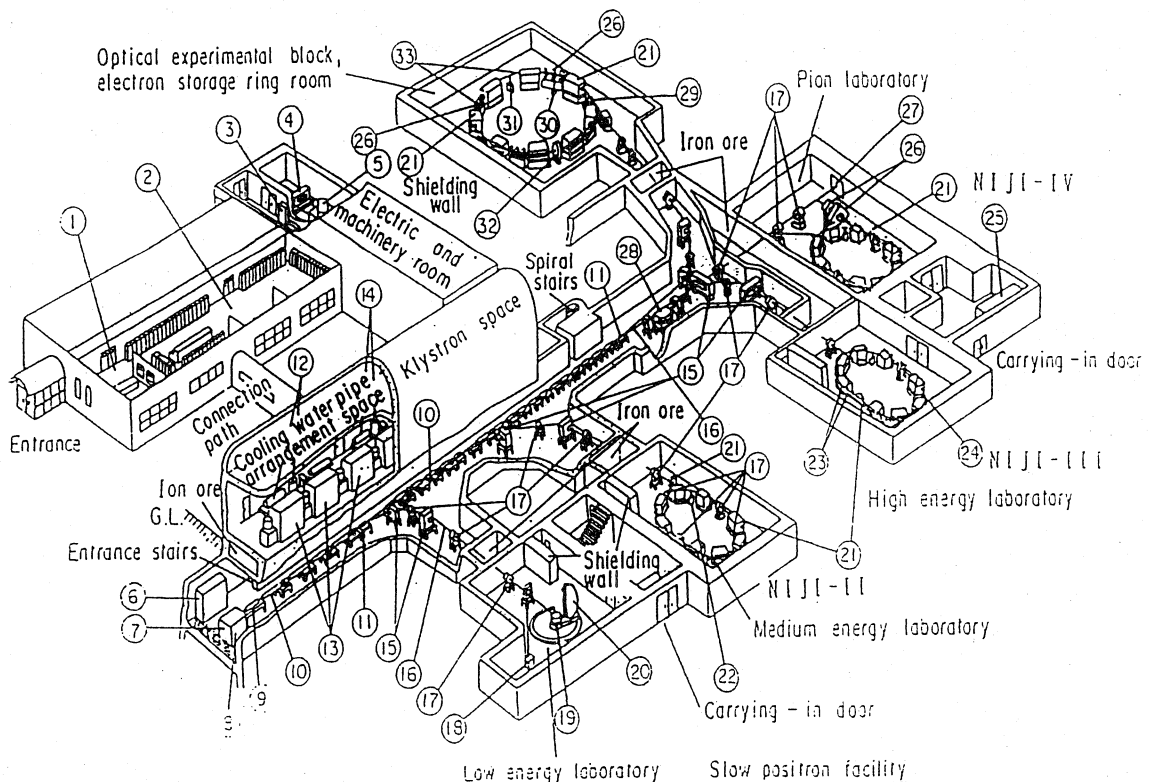


図1 電総研電子リニアック関連施設鳥瞰図

蓄積リングTERASとNIJI-IVにおいて短波長領域の自由電子レーザー（FEL）の研究を進め、双方共可視域での発振に成功し、現在は紫外域でのFELの研究を進めている。以下では、これらについて簡単に述べる。詳細については、個別の論文を参照して頂きたい。

2. 電子リニアック関連施設

2. 1. 電子リニアック TELL

電総研電子リニアックは1980年12月に完成した。図1の中央に位置しており、全長76mである。電子ビームは図のように5実験室に分配される。当初はクライストロンは7本であったが、その後8本に増強している。

最近リニアックの入射系の改造を進めている。後述の蓄積リングへの単バンチ入射を可能にすること、低エミッタンスで良質の大電流ビームが要求されていることが主な理由である。電子銃からプリバンチャまでは数年前に納入され、その試験結果は本研究会でも報告されている [1]。これはEIMAC社製Y646カソード・グリッドアセンブリを使用している。現在、その後にバンチャを追加してエミッタンス測定等の試験を開始しようとしているところである。試験終了後は、既設の電子銃と交換する予定である。

上記の改造は、図2に示す蓄積リングNIJI-IVへの単バンチ入射システムの構築と連動している。基本的には、NIJI-IVの加速高周波電源の出力の一部をバンチ指定器と遅延器を通して1nsパルスを駆

動し、増幅後にグリッドに印加する方式である。この様にして、3ns程度のパルス・ビームをリングに入射して、入射可能な16バンチ（間隔5ns）のうち単一バンチのみに電子を入射する。しかしながら、通常0.5 μ s以上のパルスで運転しているリニアックをいきなり1nsモードに切替えると運転条件が大きく変化し、その条件がすぐには見つからないので、図のように3ns程度まで可変のパルサを別途用意して入射条件を探る予定である [2]。

ここ数年来、蓄積リングTERASへの40mにわたるビーム輸送系の改造も行ってきた。従来は空芯のパルスコイルでビームを5°曲げて、その後本格的DC電磁石で偏向する方式を取っていたが、安定性、操作性、輸送性に問題があったので、パルスコイル方式を止めてDC電磁石のみとし、又アクロマティックな輸送系を組んだ。この改造は後述のリングへの入射効率の向上に大きく寄与した [3]。

この改造に伴い、リニアックの運転モードを従来の50ppsから2ppsに変更する必要が生じた。従来の通常のビーム・ローディングのモニタ法では、低パルス運転時にはオシロスコープの輝度が下がり、また長い距離での減衰の問題もあったので、高速ADCを用いたモニタを開発して設置し [4]、現在順調に稼動している。

2. 2. 低速陽電子施設

低エネルギー実験室は低速陽電子線発生に使われており、直流化もここで行われている。図1では省略してあるが、ターゲットと減速部は局所遮蔽の中であり、隣の陽電子実験室は低バックグラウンドになっている。最近、陽電子ビームを短パルス（150ns）列にすることに成功し [5]、固体表面付近の欠陥等の物性研究が可能になってきた。さらに、陽電子消滅励起オージェ分光法や高輝度化の研究にも着手している。

2. 3. 蓄積リング Teras

蓄積リングTERASは、1991年10月に稼動開始した。当初最高エネルギーは600MeVであったが、電磁石電源等の改造により現在は800MeVとなっている。

最近、挿入光源の増設や変更と並行してリングの改造を行い、最大蓄積電流は350mAを越え、750MeVで300mAの蓄積が可能である [6]。以前は、

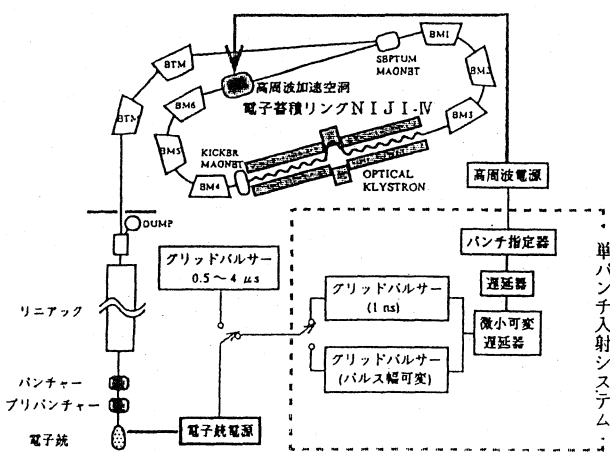


図2 単バンチ入射システム

シンクロtron放射取出し用あるいはモニタ用窓の熱による破損のために最大電流を170mA程度に抑えていたが、モニタ用の窓の前には金属ミラー、また取り出し窓の前にはバルブを取り付けて、破損の問題は解消している。しかし、放射線障害防止法に基く申請の遅れから、300mA以上の蓄積時にはリング室への立入は禁止されている。TERASは共同利用施設であり、図3に示す様に多目的に利用されている。最近の主な動きは、偏光可変アンジュレータの設置位置を変えて実験がリング室でなく実験室で行う様になったこと、TERASでのFELの実験がNIJI-IVに移行してその後に10T超伝導ウイグラが設置されていること等である。レーザー・コンプトン散乱の研究では、準単色 γ 線のエネルギー範囲が20MeVまで拡大され、偏極 γ 線の発生も可能になった。RF-KO法による単バンチ運転も実現している。

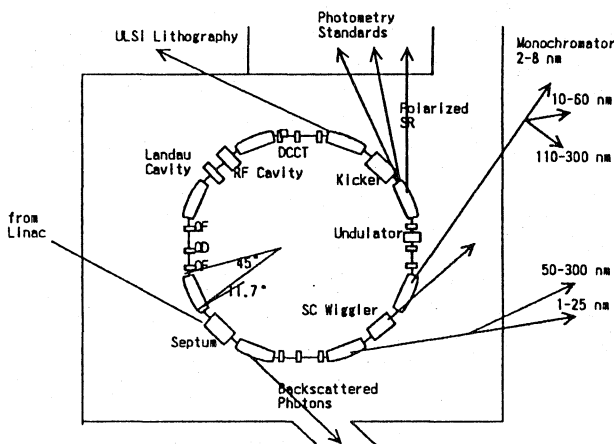


図3 蓄積リング TERAS

2. 4. 小型蓄積リングNIJIシリーズ

TERASにおける放射光リソグラフィ等の研究は大きな反響を呼び、小型蓄積リングの開発が世界的に活発になった。電総研では、メーカーの協力を得てNIJIシリーズを開発してきた[7]。

平均直径約4mのNIJI-Iは、小型化のためのテスト・リングとして官民連帯共同研究において住友電気(株)との協力で建設され、1986年にビーム蓄積に成功した。その成果は大きかったが、NIJI-IIの建設に伴って解体された。

NIJI-IIは、それに続くリソグラフィ用テスト・リングとしてやはり住友電気(株)との協力によって1989年に完成した。現在その役目はNIJI-IIIに移行し、NIJI-IIは光プロセス研究用リングとな

り、光CVD等の研究に利用されている。1.5mの直線部を有しているため、そこに当所で2台目の偏光可変アンジュレータが設置されている。

NIJI-IIIは、電総研の特許を基に住友電気(株)が新技術事業団の融資を受けて開発したリソグラフィ用超伝導リングである。波動リング法等の試験も完了し、近く同社の西播磨の研究所に移転する予定である。

NIJI-IVについては、次節で述べる。

3. 蓄積リング自由電子レーザー

電総研では、1984年から蓄積リングFELの研究を行っている。以下にその概要を述べる。

3. 1. TERAS自由電子レーザー

電総研では1985年に光クライストロン(optical klystron, OK)を完成、以降TERASにおいて自発放射光発生とスペクトル測定、微小光共振器損失測定等の実験を行い、1989年にゲイン測定、1991年3月に可視域(598nm)での発振[8]、その後2波長同時発振やQスイッチングの実験にも成功した。以上は全て国内初であった。

TERASは直線部が短くFELゲインが低いので、図4に示すOKを使用した[9]。永久磁石は、世界で初めて新稀土類永久磁石(NEOMAX-35, Nd-B-Fe系)を用いたが、以降この素材を用いたアンジュレータが従来のSmCo₅以上に流行するようになった。OKは電子ビームのエネルギー幅に非常に敏感で、従って高品質ビームが要求される。TERASでは、電子ビームが安定な場合通常のアンジュレータの3~5倍のゲインが得られることが実証された。

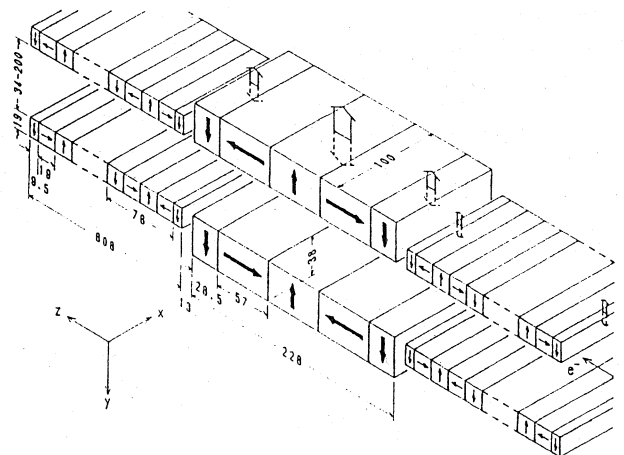


図4 ETLOK-I

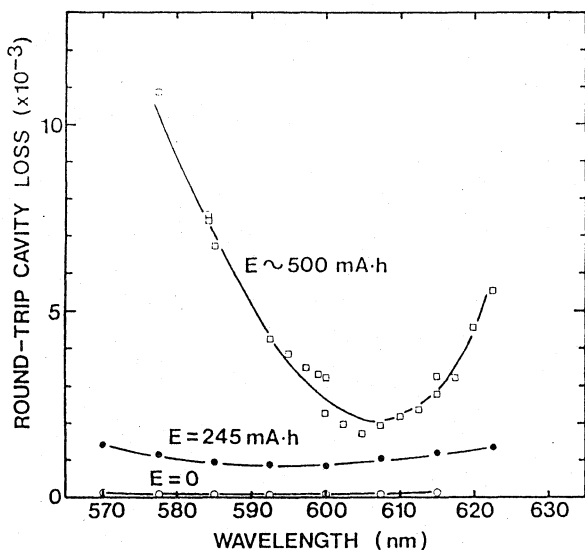


図5 光共振器損失

短波長FELではゲインが非常に低いので超低損失光共振器が必要になる。電総研では微小損失を減衰時間法で測定し、使用前の585nm用ミラー1枚当りの損失は40ppm程度であった。しかし、短波長領域で多用さ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、その場測定も可能なシステムを完成させてモニタしている。図5は結果の一例であるが、照射量に伴って損失が増加し、有効波長帯域が狭くなり、最適波長も長波長にシフトする [10]。また、FELゲインが低いので、電総研では先ず自発放出光を光共振器で共振させ、出力光をストリーク・カメラで受けてその時間構造を観測して10 μ m程度の粗調整を行い、その後発振条件を捜しながら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方法を開発して成功している [10]。ミラーは超高真空中にあるので精密調整も難しいが、ステップモータとピエゾ素子を併用した駆動精度0.2 μ m以上の超高真空ミラー精密駆動装置を試作した。

TERASの通常運転では周長31.45m中に18バンチのビームが回転しているが、FEL発振には3バンチのみが必要で、残りのバンチは自発放出光を発生してミラーの劣化を促進する。そこで、2段階RF-KO (radio-frequency knockout)法を用いて3バンチに落しているが、より効率的なRF-KO法を現在開発中である。3バンチ・モードでも電子エネルギー幅がFELの要求よりは広いので、さらにビームを安定

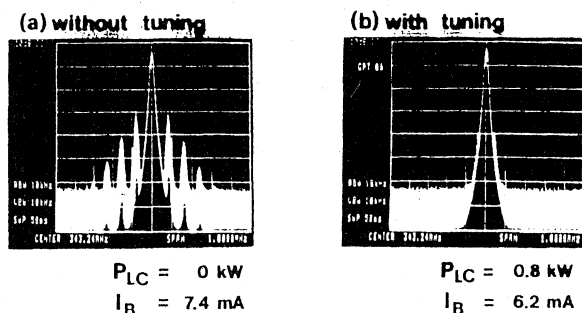


図6 電子ビームの安定化

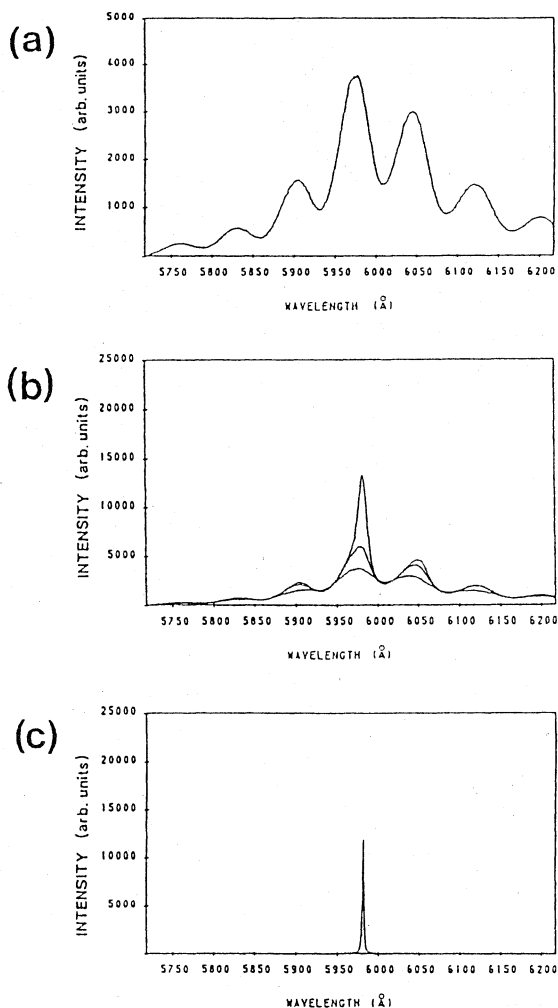


図7 TERAS-FELの出力スペクトル例

化するために加速高周波の2倍高調波のLandau加速空胴を設置して、主にバンチ間相互作用を抑制している [8]。図6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。Landau加速空胴を動作させないと(a)の様に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。Landau加速空胴を働かせて調整すると(b)

のようにサイドバンドが消え、電子ビームのエネルギー幅やバンチ長が急速に狭くなる。電子ビームのバンチの3次元のサイズの系統的な精密測定も行っている。

TERASでの実験ではゲインが低いので、外部レーザーによるゲイン測定が必要であった。測定法については省略するが、バンチ当たり1.6mAの蓄積電流で 1×10^{-4} 程度のゲインが得られた[10]。これは上記の安定化以前の値で、実際の発振実験ではゲインはより高かった。

発振実験では、出力光スペクトルは分光器と組合わせ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た[8]。図7(a)は発振前の自発放出光、(b)は発振の閾値付近、(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落してある。この様な測定結果からFELのピーク出力は15mW程度と推定された。(b)、(c)の発振スペクトルのピークは598nmにあるが、光がコヒーレントになったためその幅が狭く(0.3nm以下)になっている。この後、597nmと591nmの2波長同時発振やFEL特有のQスイッチング法によるピーク出力の増大にも成功している。本FELシステムは1992年に閉鎖された。

2. 2. NIJI-IV自由電子レーザー

TERASでは上記のような成功を納めたが、長いアンジュレータが設置できないため大幅な短波長化は望めない。電総研では川崎重工(株)と協力して世界初のFEL専用小型蓄積リングNIJI-IVを建設し、1990年12月に完成、1991年2月に初のビーム蓄積に成功し、現在最大蓄積電流150mAを記録している[11]。リングの周長は29.6mであるが7.25mの長直線部を有する。1992年に6.3mのOKを設置してFEL実験を開始し、同年8月に電子エネルギー240MeVで595~589nmでの発振に成功して装置の順調動作を実証し[12]、9月には265MeVで488nmでの発振にも成功して、可変波長範囲は100nm以上に広がった[13]。蓄積リングとFEL実験は共にTERASでの経験で手法の多くが確立していたので、実験は円滑に進んだ。TERASの場合との主な違いを以下に簡単に述べる。

直線部が長くてビームのエミッタンスが小さく、安定領域の広い小型リングの設計は困難であったが、新しい電磁石配置を考えて対応することができた[14]。OKが非常に長いので、高い製作・設置精度が要求され、また駆動機構には多大な工夫を要した[15]。OKの片側のアンジュレータの周

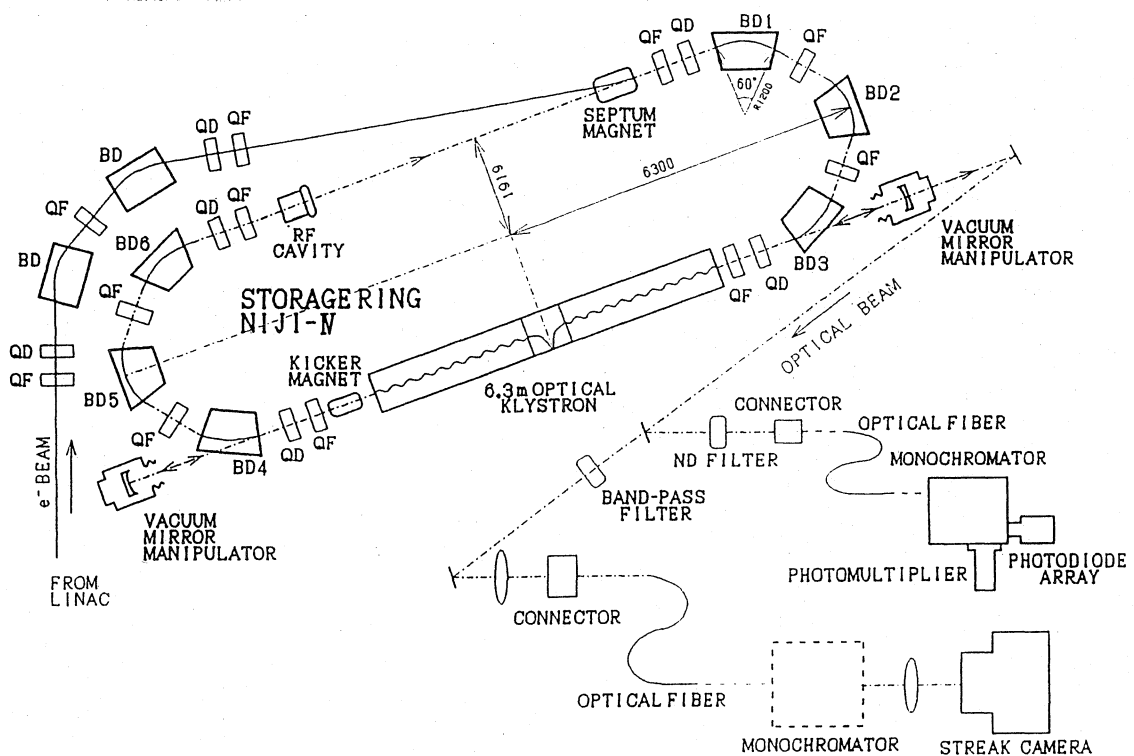


図8 NIJI-IV-FELシステム

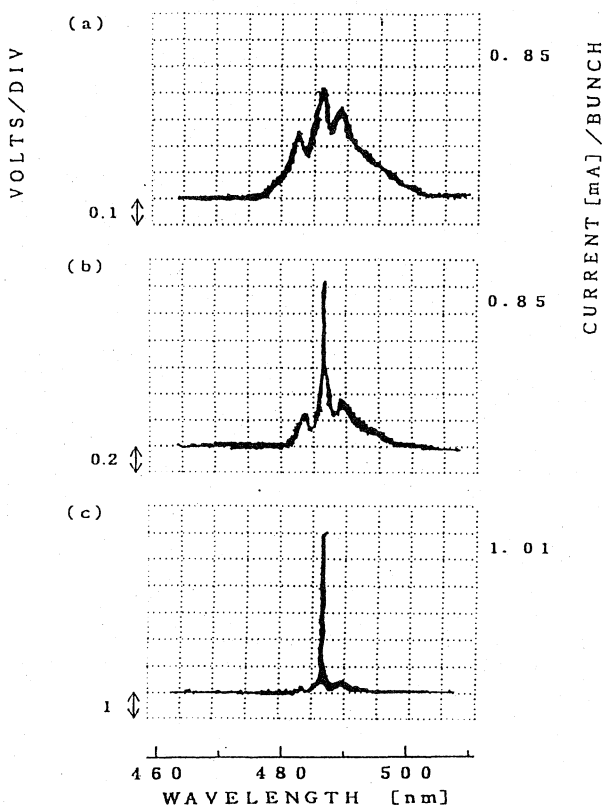


図9 NIJI-IVシステムでの488nmでの発振

期長は72mmで周期数は42であるが、OK全体の持つ収束力が小型リングでは無視できず、収束電磁石の電流に相当に大きな修正を施した。OKの間の6.5mの長くて薄い超高真空槽はベーク時の塑性変形と熱膨張に対して対策が必要であった。図8に、NIJI-IVとFEL実験の配置を示す。発振の状況等は前記のTERASの場合と似ているが、488nmでの発振前後の出力光スペクトルを図9に示しておく。(a)は発振前、(b)と(c)は発振中で、(c)ではフィルタを入れてある。

その後、FELをより短波長化して紫外領域に入るべく準備研究を行っている。例えば、350nmではFELゲインは600nm付近での1/2.5となり、また光共振器損失も6倍になるので、ビームの質等を見ても約15倍のピーク電流が必要になる。現在のRF-KO法の代わりに単バンチ入射を行う前述の試みもその目的に沿っている。リングの低エミッタンス化、skew四重極電磁石と六重極電磁石の設置、ミラー損傷の回復等の研究も準備中である。

最後に電子リニアック施設を設計段階から指導してきた冨増多喜夫博士(現自由電子レーザー研

究所)、協力頂いている施設ユーザ、住友電気(株)、川崎重工(株)の方々に深く感謝する。

参考文献

- [1] T. Mikado, T. Yamazaki, R. Suzuki, S. Sugiyama, H. Ohgaki, M. Chiwaki, K. Yamada, T. Noguchi, and T. Tomimasu, *Proc. 14th Linac Meeting* (1989) p. 97.
- [2] R. Suzuki, T. Mikado, H. Ohgaki, M. Chiwaki, K. Yamada, N. Sei, S. Sugiyama, T. Noguchi, and T. Yamazaki, *a paper in these proc.*
- [3] H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, R. Suzuki, T. Noguchi, and T. Tomimasu, *Proc. 16th Linac Meeting* (1991) p. 290.
- [4] R. Suzuki, T. Mikado, S. Sugiyama, M. Chiwaki, H. Ohgaki, K. Yamada, T. Yamazaki, and T. Tomimasu, *Proc. 14th Linac Meeting* (1989) p. 140.
- [5] R. Suzuki, Y. Kobayashi, T. Mikado, H. Ohgaki, M. Chiwaki, T. Yamazaki, and T. Tomimasu, *Jpnse J. Appl. Phys.* **30** (1991) 532.
- [6] S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, R. Suzuki, N. Sei, M. Koike, K. Yagi, M. Yuri, T. Noguchi, and T. Yamazaki, *Proc. 9th Symp. Acc. Sci. and Tech* (1993) to be published.
- [7] T. Tomimasu, *Rev. Sci. Instr.* **63** (1992) 722.
- [8] T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Tomimasu, T. Noguchi, T. Mikado, M. Chiwaki, and R. Suzuki: *Nucl. Instr. and Meth.*, **A309** (1991) 343.
- [9] T. Yamazaki: *Free Electron Lasers II*, Y. Petroff, ed. *Proc. SPIE* 1133 (1989) 62.
- [10] T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, T. Tomimasu, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, and H. Ohgaki, *Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nucl. Energy Research*, JAERI (1990) p. 308; K. Yamada, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Tomimasu, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, and H. Ohgaki: *Nucl. Instr. Meth.* **A304** (1991) 86.
- [11] M. Yokoyama, M. Kawai, K. Owaki, S. Hamada, K. Aizawa, Y. Oku, A. Iwata, M. Yoshiwa, T. Yamazaki, S. Sugiyama, H. Ohgaki, K. Yamada, K. Yamada, N. Sei, T. Mikado, T. Noguchi, and R. Suzuki, *Proc. 14th FEL Conf.*, *Nucl. Instr. Meth.*, to be published.
- [12] T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, N. Sei, T. Mikado, T. Noguchi, M. Chiwaki, R. Suzuki, M. Kawai, M. Yokoyama, K. Owaki, S. Hamada, K. Aizawa, Y. Oku, A. Iwata, and M. Yoshiwa: *Proc. 14th FEL Conf.*, *Nucl. Instr. Meth.*, to be published.
- [13] T. Yamazaki, K. Yamada, N. Sei, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Mikado, T. Noguchi, M. Chiwaki, R. Suzuki, M. Kawai, M. Yokoyama, S. Hamada, and T. Tomimasu, *Proc. 1st Asian FEL Symp.* (1993) to be published.
- [14] T. Tomimasu, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Yamazaki, K. Yamada, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, S. Suse, A. Yoshiwa, and A. Iwata, *Proc. 7th Symp. on Acc. Sci. and Tech.*, Osaka Univ., (1989) p. 347; H. Ohgaki, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Mikado, R. Suzuki, and T. Tomimasu, *ibid.*, (1989) 284.
- [15] T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Tomimasu, and M. Kawai: *Nucl. Instr. and Meth.*, **A318** (1992) 142.