



自由電子レーザー専用小型蓄積リング NIJI-IVの現状

山崎 鉄夫, 山田 家和勝, 清 紀弘, 大垣 英明,
杉山 卓, 三角 智久, 鈴木 良一, 野口 勉, 千脇 光國

電子技術総合研究所

河合 正之, 横山 稔, 浜田 信二,
岩田 章, 中川 茂友

川崎重工業(株)

A Compact Storage Ring NIJI-IV Dedicated to Free-Electron Lasers

**T. YAMAZAKI, Y. YAMADA, N. SEI, H. OHGAKI, S. SUGIYAMA,
T. MIKADO, R. SUZUKI, T. NOGUCHI and M. CHIWAKI**

Electrotechnical Laboratory

M. KAWAI, M. YOKOYAMA, S. HAMADA, A. IWATA and S. NAKAGAWA

Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

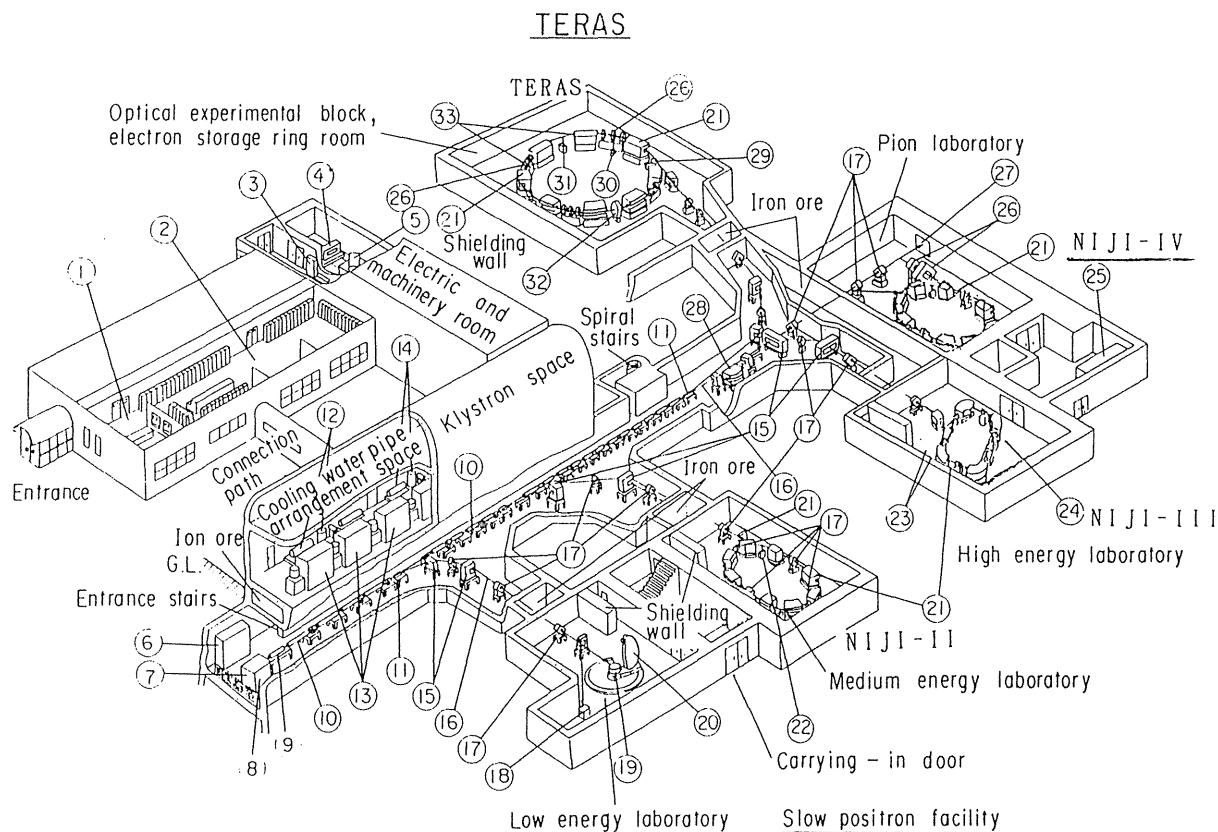
An outline is presented of the present status of a compact storage ring NIJI-IV dedicated to free-electron lasers (FELs). The ring is of a triple-bend achromat type with 7.25-m long straight sections, though the circumference is 29.8 m. The construction of the ring was completed in Dec. 1990, and the first storage of the electron beam was achieved in Feb. 1991. Experiments related to FELs began in Apr. 1991, and the first lasing at 589~595 nm was observed in Aug. 1991. The tunable range of the FEL was extended over 100 nm in Sep. the same year. The betatron tunes have recently been changed to realize a low-emittance mode. A single-bunch injection system is now being prepared in order to increase the peak current.

1. はじめに

電総研には、図1に示す様に1981年から稼働している蓄積リングTERASと数台の小型蓄積リングがある。TERASは年々改良が加えられ、所内外共同利用のリングとして使用されている。NIJI-Iは試験用小型リングで、NIJI-IIの建設に伴って閉鎖された。NIJI-IIは官民連帯共同研究で建設され、現在は偏光可変アンジュレータ放射を含めたシンクロトロン放射プロセス用として使用されている。NIJI-IIIは、リソグラフィ用リングとして住友電気㈱が電総研の特許を基に新技術事業団の委託を受けて開発したもので、現在は播磨地

区の同社の研究所に移転して稼働を再開しようとしている。NIJI-I～IIIは、電総研と住友電気㈱の協力で建設された。NIJI-IIとIIIについては、本特集に別稿があるので、参照されたい。

自由電子レーザー (free electron laser, FEL) は広い範囲での波長可変性、高出力、高効率、未踏波長領域での可能性等の魅力を備えた次世代のレーザーとして期待されている。FELの応用分野は、慣性核融合やトカマクの加熱源、同位体分離に代表される原子力分野、原子・分野の基礎的研究、レーザー加工、医学・医療分野、光CVD等の材料創製、X線レーザー、レーザー加速器等、様々な



- (1) Management room (2) Measurement and control room (3) Betatron control room (4) Pair spectrometer
 (5) Betatron (6) Electron gun pulser (7) Electron gun (8) Ion pump (9) Buncher (10) accelerating section, lens, and ion pump cooling pipe arrangement (11) Pulsed deflection coil (12) Accelerating section cooling device (13) Klystron pulser (14) Klystron cooling device (15) Bending magnet (16) Vacuum duct and cooling pipe arrangement (17) Quadrupole magnet and ion pump (18) RI irradiation equipment (19) Scattering chamber and ion pump (20) Compton spectrometer (21) NIJI-IV
 (22) Ion pump (23) Beam line (planning) (24) NIJI-III (25) Magnet power supply (26) Quadrupole magnet for pion channel (27) Beam catcher (28) ECS magnet (29) Turbo molecular pump (30) Sputter ion pump (31) Ti getter pump (32) RF accelerating cavity (33) SR beam line

Fig.1 Layout of the ETL linac and storage-ring facility.

ものが挙げられる。従来FELの研究は既存の加速器に寄生して行われることが多かったが、FELに特有な加速器に対する要求があり、またマシン・タイムの制約も大きかった。NIJI-IVは世界初のFEL専用小型蓄積リングであり、電総研と川崎重工業(株)の協力で建設され、1990年12月に完成し、1991年2月に稼働開始した。以降蓄積電流は順調に向上し、1992年の4月からFEL関連の実験が開始され、同年8月から9月にかけて595nm～488nmでのFELの発振に成功してFELの最大の特長である波長可変範囲は100nmを越えた。しかし、NIJI-IVは現在所期設計通りのモードでは運転されておりエミッタンスも大きい。より短波長でのFELの発振やFELの高品質化を考えると、ピーク電流の増大、エミッタンスの減少が必要であり、現在これらに向けた研究が行われている。

以下では、蓄積リングNIJI-IVに主眼をおいて述べる。FELについては、本誌等での解説¹⁾やそこに載っている文献等を参照して頂きたい。

2. NIJI-IVの基本設計

TERASからNIJI-IIIまでのリングは、シンクロトロン放射の発生と利用のための専用リングであったが、周知の如く通常のシンクロトロン放射は赤外から軟X線までの幅広い領域をカバーする代わりに各々の波長域ではそれ程高輝度ではなく、またレーザーのようにコヒーレントでないという短所もある。アンジュレータ放射の様な準干渉性の放射もあるが、シンクロトロン放射とレーザーの長所を兼ね備えた波長可変な次世代のレーザーとして最近FELが注目されている。電総研では、蓄積リングTERASにおいて1991年に国内初の可視域(598nm)FELの発振に成功した²⁾が、TERASの直線部は短く(1.8n)、大幅な短波長化は困難であった。従って長い直線部を持つリングの構想は以前からあった。TERASでのFELの実験と並行してNIJI-IVの建設が1990年から進められ、同年12月に建設が完了した。以降入射実験が行われ、

1991年2月に初のビーム蓄積に成功した³⁾。

FEL専用のリングとして要求されたものは以下の通りである。

(1) 小型であること。これは、将来のFELの応用範囲の広がりや産業への応用を考えた選択である。(2) FEL用直線部が長いこと。FELゲインはアンジュレータの磁場周期数の3乗(光クライストロンの場合には2乗)に比例する¹⁾。(3) 高いピーク電流が可能であること。これは、FELのゲインが電子密度に比例するので当然の要求である。(4) 低エミッタンスであること。これは、(3)と、光共振器内のレーザービームと電子ビームの重畳が重要であることからの要求である。(5) 長直線部での運動量分散関数がゼロであること。これはアンジュレータを置く直線部では当然の要求である。(6) 電子ビームのエネルギー幅が小さいこと。特に光クライストロンを使用する場合FELゲインはエネルギー幅に敏感である¹⁾。

表1に示すNIJI-IVの基本設計パラメータは、以下の要求と実験室の寸法、経済性等の実際的な問

Table 1 Fundamental parameters of the storage ring NIJI-IV

Maximum beam energy (MeV)	500
Circumference (m)	29.6
Lattice type	teiple-bend achromat
Periodicity	2
L_s/C_r	0.49
Bending angle (°)	60
Field index	0
Edge angle (°)	16.1
Harmonic number	16
Radio fequency (MHz)	162
Maximum RF power (kW)	2.5

題を考慮して決定された⁴⁾。最高エネルギー500MeVは、目標とするFELの波長から決められた。他の条件が同じであれば電子エネルギーを高くするとFEL波長は短くなる。Triple-bend achromatのラティスは、(2), (4), (5)の要求から決定された。エミッタンスは偏向電磁石数の3乗に逆比例する。QF-1とQDがラティスを決定し、QF-2は長直線部の分散関数を零にするために設置された。リング周長29.6mと偏向軌道半径1.2mは、実験室の大きさから来る光共振器長への制約から決められた。偏向電磁石の n 値は零であるが、エッジには 16.1° の角度をつけ、上下方向の集束を兼ねることにした。両端部はRogowski曲線を近似させて、磁場強度変化に対する縦方向磁場分布の相似性を保つことにした。各偏向電磁石には、主コイルの1.5%相当の補助コイルを用意した。リングの加速空洞はTERASで以前使用していたものを流用した。以上の要求を満たすリング

として、計算機によるシミュレーションの結果NIJI-IVは図2の形をとることとなった^{4),5)}。図にはFEL実験の配置も同時に描いてある。この設計ではベータatron振動数(チューン)の選択幅も広がっているが、横方向のチューン ν_x が2.3と2.85付近でエミッタンスが小さくなることが予想されていた。直線部の長さ(L_s)がリングの周長(C_r)に占める割合 $L_s/C_r=0.49$ は、他に例を見ない。NIJI-IVの写真を図3に示す。

図2のFEL実験に関する部分を簡単に説明しておく。OKが設置された長直線部の上流側と下流側に光共振器ミラーが14.8mの距離を隔てて超高真空ミラー・マニピュレータの中に置かれている。共振合は、下流側ミラーからの出力光プロフィールをCCDカメラで観測しながら粗調整を行う。CCDカメラを用いるのは、紫外領域では肉眼で見にくいからである。微調整は、上流側からの出力光スペクトルを見ながら行う。FEL出力は、

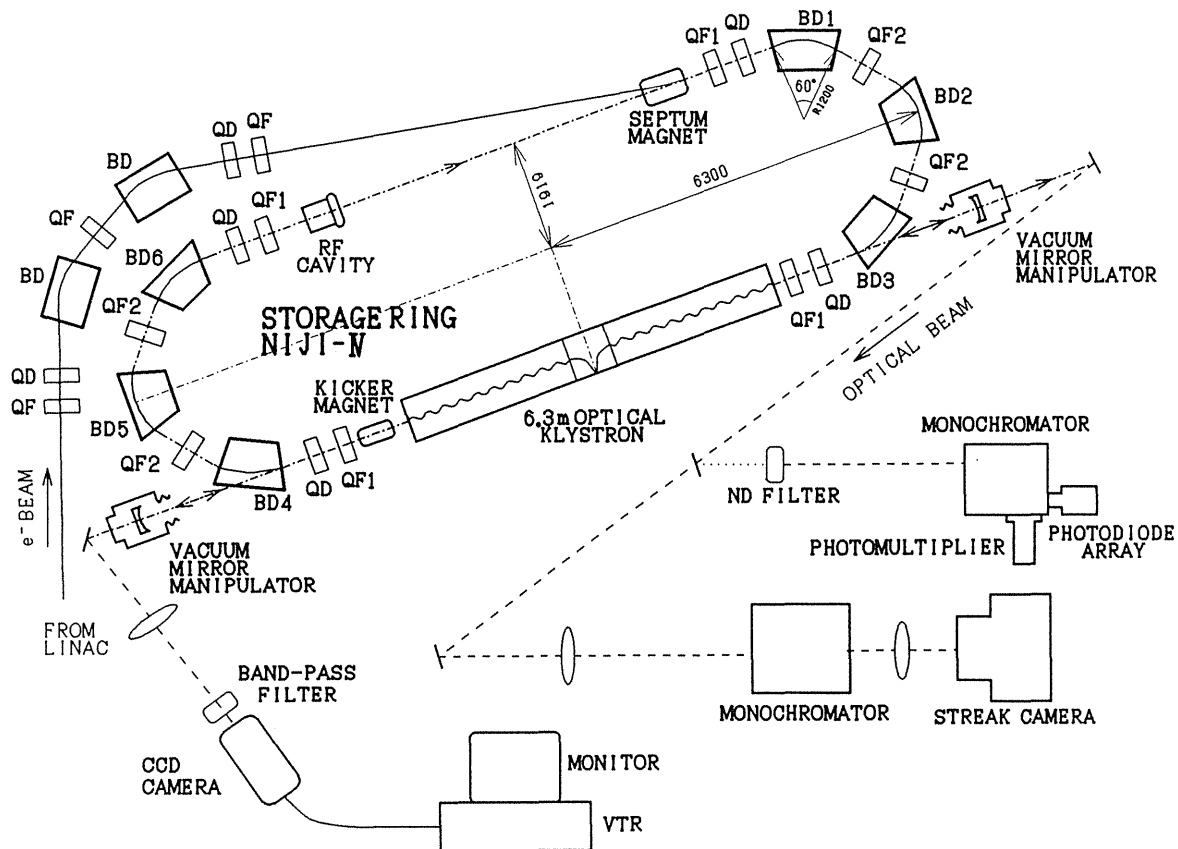


Fig.2 NIJI-IV FEL system.

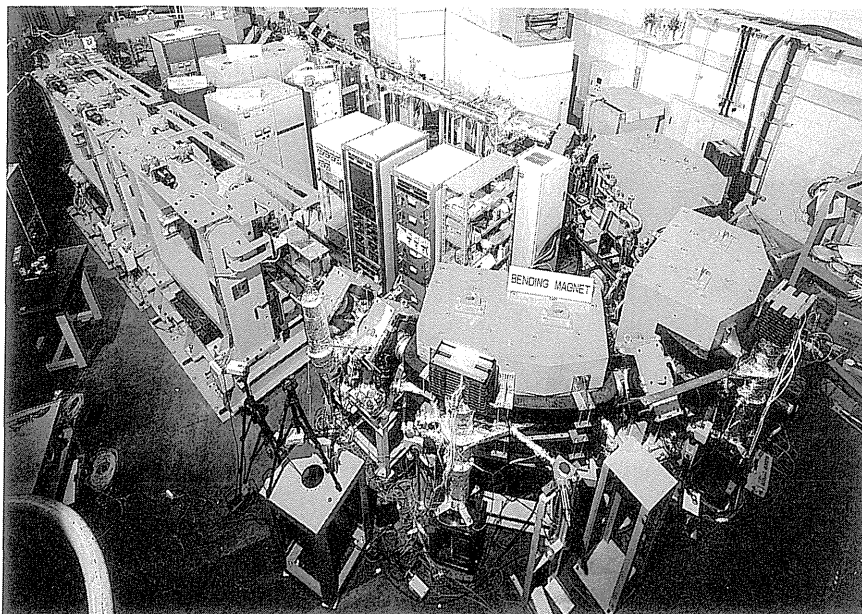


Fig.3 Photograph of NIJI-IV.

自発放射光との重畳を避けるために上流側のミラーから取り出される。出力光は分光器を通り、そのスペクトルは後に置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。この分光系の波長分解能は0.2nm, 時間分解能は33msである。出力光の一部はストリーク・カメラに取り込まれ, 光共振器長調整に使用される。

6.3mの光クライストロン(optical klystron, OK, ETLOK-II)の通常アンジュレータ部の周期が72mmで周期数は各42である。周期長はTERASで使用したETLOK-Iの76mmより短い, NIJI-IVの電子ビームの質がTERASのそれより優れていると期待して設計された。さて, この様に長いOKでは多数回の斜入射・斜出射によって上下(y)方向の収束力が生じる。NIJI-IVの様な小型リングではこの影響が無視できず, 図4に示すように y 方向チューンに大きなシフトが生じ, また図5の様にdynamic apertureも著しく小さくなる。これを補正するためには, 図の様にリングの四重極電磁石の集束力を補正する必要があることが予想された⁶⁾。

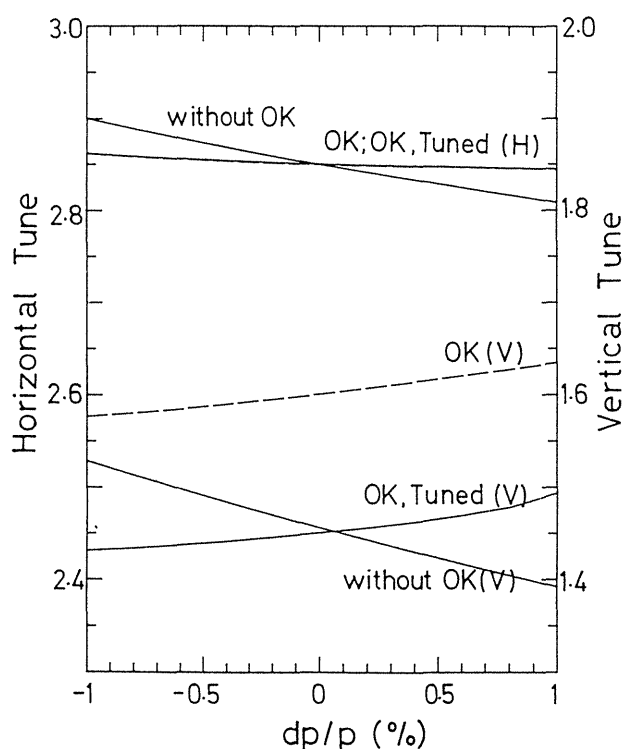


Fig.4 Vertical and horizontal tunes as a function of momentum dispersion. The tunes with and without the OK are compared. Tunes after the betatron-tune correction are shown also.

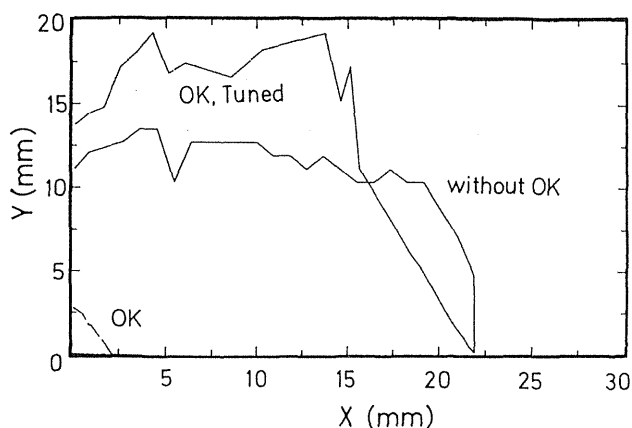


Fig.5 Dynamic aperture for the stored beam with the relative momentum spread of $\pm 0.15\%$.

3. 入射・蓄積実験

リングへの入射は電総研リニアックから直接行われ、通常のスепタム・コイルとキッカー・コイルを用いている。入射エネルギーは約310MeVである。前述のようにリングは1990年12月に完成し、直ちに入射実験が開始され、真空の枯らし運転やビーム輸送系、モニタ系の整備を経て1991年2月には初のビーム蓄積に成功し、同年の夏には蓄積電流も70mAまで向上した³⁾。チューンはRF-KO (radiofrequency knockout) 電極、4分割ダイオード、FETアナライザを用いて測定されたが、当時の蓄積モードは所期の設計の横方向チューン2.3あるいは2.85付近ではなく、 $\nu_x = 1.595$ 、 $\nu_y = 1.300$ という低いチューンであり、従ってエミッタンスも目標の10倍程度で非常に大きかった。当時設計中であったOKを用いると、これでも可視域でのFELの発振は可能であると予測され、とりあえずこのモードで実験を行うこととし、蓄積実験が続けられた。こうして、入射効率は低いながらも1992年夏には平均蓄積電流約130mAが達成された。前述のOKによるチューン・シフトとOKによる閉軌道歪(closed-orbit distortion, COD)を避けるために、入射は現在でもOKのギャップを大きく開いて行っている。

一方、6.288mの長尺のOKや光共振器系の準備

も並行して進められた。OKの最小ギャップは36mmに設定され、その間の長さ6.4mの真空槽の外形の高さは34mmで、厚さ6mmのSUS-304を用いたため、蓄積ビームの上下のクリアランスは ± 11 mmである。重さによる真空槽の垂れ下がりやベーキング時の膨張と塑性変形にも注意する必要がある。膨張に関しては支持部に滑り機構を付け、垂れ下がりについては真空槽の要所に上下から細いワイアで引っ張りその強さを変えることによって随時調整可能である。真空のコンダクタンスが悪いので、この長尺真空槽には2台のスパッタ・イオンポンプを取り付けてある。光共振器はTERASで使用したものを移動させた。

4. 自由電子レーザー・モードでの運転

1992年4月末には一応の準備が整ったので、直ちにFEL関連の実験が開始された。FELの実験では、以下に述べる様な特殊なモードでリングを運転する必要がある。

NIJI-IVの通常運転では周長29.8mの中を16バンチのビームが周回しているが、FEL発振には1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、蓄積リングTERASで用いたトラッキング・ジュネレータを併用する2段階RF-KO法を適用して1バンチに落した²⁾。第1段階では2バンチとし、第2段階で1バンチにする。図6は、RF-KO前後の電子ビームの時間構造を示している⁷⁾。ボタン型モニタを使用したため、微分波形となっているが、バンチ数はわかる。第2段階でのRF-KO時にビーム不安定性が生じるため、最終的な1バンチ・モードでの蓄積電流は決して高くなく、時には2バンチ・モードでFEL実験を行った。ピーク蓄積電流はTERASの場合と同様に平均蓄積電流によって規制されているので、入射中に初段階のRF-KOを行っている。

バンチが落ちたところで、目標のFEL波長に合わせてビームエネルギーを変化させる。例えば

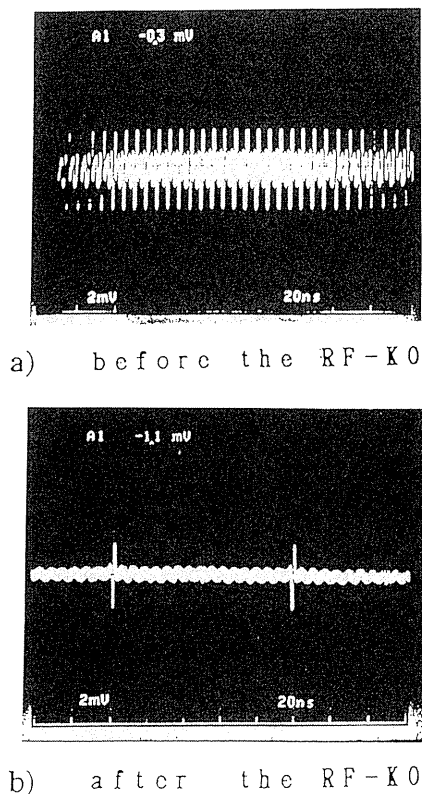


Fig.6 The bunch structure before the RF-KO (a) and that after the RF-KO.

590nm の場合は 240MeV, 488nm の場合は 265MeV であった。この間, 多少のチューン補正と COD 補正が必要である。その後 OK ギャップを狭める。前述の予想の通りギャップを変化させるとチューンが変化するので, チューンをモニタしながらそれを一定に保つように四重極電磁石の電流を変える必要がある。図7は電子エネルギー 240MeV の場合のギャップの変化に伴う QF1 と QD の電流の変化を示している。

FEL の実験においては, 電子ビームの軌道を OK の中心軸に一致させ, さらに共振器の軸もそれに一致させる必要がある。OK は理想的な電子軌道に合せて設置したが, 初期の頃は四重極電磁石の設置誤差があってリング自体に COD があり, OK の中でも多少の軌道のずれがあるために結果的に電子軌道と OK 軸のずれは大きく, FEL 実験の前にこれを補正する必要があった。四重極電磁石の設置誤差を 0.3mm 以下とした現在でも多少のず

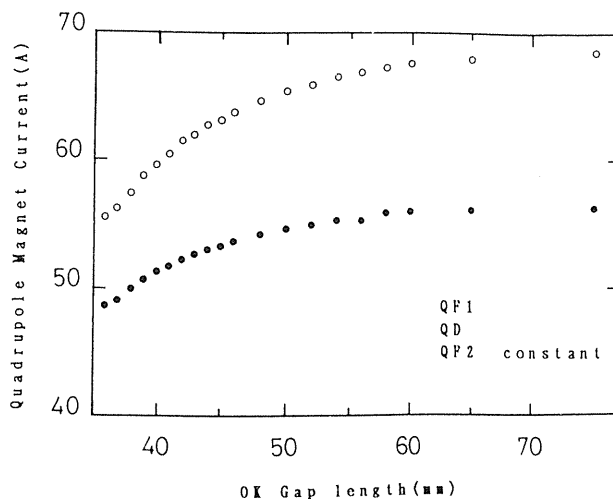


Fig.7 Variation of the current of the quadrupole-magnet power supplies vs. OK gap.

れはある。これらの軸合せにはアルゴンレーザーあるいは色素レーザーを用いた。先ず, レーザーを上流側から入射し, その軸を理想的な軌道に合せておく。次にビームを蓄積して OK からの自発放出光をレーザーと重畳させ, 距離を隔てた数ヶ所において双方のプロフィールを観測し, 両軸が一致する様に電子ビーム軌道を調整する。電子ビームの x 方向の調整は偏向電磁石の補正コイル, y 方向の調整は随所に設置されたステアリング・コイルによって行った。共振器ミラーの回転の非常に粗い調整は, レーザーの少数回の反射光が軸に一致させることで行い, その後は実際の共振パターンと出力スペクトルを観測しながら微調整を行っている。

リングに関しては大体以上の調整を行うことにより, 1992年8月に 589~595nm での FEL の発振に成功して⁵⁾ NIJI-IV システムが順調に稼働することが確認され, 同年9月には 488nm での発振にも成功して⁶⁾, このシステムでの波長可変範囲は 100nm 以上に拡大された。

5. NIJI-IV の現在と将来

NIJI-IV システムにおいて FEL をさらに短波長

化したり FEL の高度化を図るためには、これまでの運転モードでは不十分なことがわかってきた。例えば、FEL ゲインと光共振器ミラー損失を考慮すると、単純には 350nm での FEL 発振のためには 600nm の場合の 15 倍以上のピーク電流が必要である。そこで、本年 6 月から運転モードの変更の実験を行っている。

前述の通り、最近までは低いチューンで運転していた。これは、四重極電磁石の位置調整が良くなかったので集束力を強めると COD が大きくなって入射・蓄積が困難なためであった。そこで、位置調整をやり直して COD を小さくした。しかし、低いチューンでは入射・蓄積、ビーム寿命には殆ど影響がなかった。

従来の運転モードと現在のリングの配置をもとに新しいチューンでの計算を行い、低エミッタンスで長直線部での運動量分散関数が零で、かつ入射時に入射ビームも蓄積ビームもキッカー・コイルの摂動によって失われないモードを探した。そのモードでの入射実験を行っているが、最近最大蓄積電流は従来のモードでのそれを上回る 140mA を記録した。入射効率は格段に向上し、現在大気開放後 2 週間で 2.5mA/s 程度であるが、入射用セプタム真空槽の壁で半分近くの入射ビームが失われているので真空槽を改造中である。従来のモードと新しいモードでのベータatron 関数と分散関数を図 8 に示す。また、新旧のモードでの主なパラメータを表 2 に比較してある。新しいモードではエミッタンスが相当低く、バンチ長も短くなっている。

図 9 には、新旧のモードでの 350nm 付近での OK からの自発放光スペクトルを比較してある⁹⁾が、(a) の以前のモードでは OK 特有の微細構造の谷の長波長側に不自然な盛り上がりが見られる。電子ビームのエミッタンスが大きい時にはこのようになることが計算機シミュレーションから予想されていた¹⁰⁾。現在のモードでは図 (b) の様に不自然な盛り上がりが消え、スペクトルの形が良くな

っており、電子ビームが低エミッタンスになっていることが裏付けられた。

リングの真空は OK 用直線部を除くと 13 台のスパッタ・イオンポンプと 12 台のチタン・ゲッタポンプで引いているが、ポンプの設置場所が限られているためにスパッタ・イオンポンプの排気速度が遅いので真空度はさほど良くなく、蓄積電流がない時で 5×10^{-8} Pa 程度であった。最近、He リーク・ディテクタで 2ヶ所での小さなリークを見つけてそれを封じたので真空度は改善しつつあり、またポンプを多少増強する予定もあるのでさらに向上することを期待している。入射時の 310MeV ではイオン・トラッピングによるチューン・シフトは殆ど観測されないが、特に大気開放直後はイオン・クリアリングが最大蓄積電流に顕著な効果をしているので、近く TERAS と同様の板極型クリアリング電極を増設する予定である。

現在の NIJI-IV では最大ピーク電流が低い。前

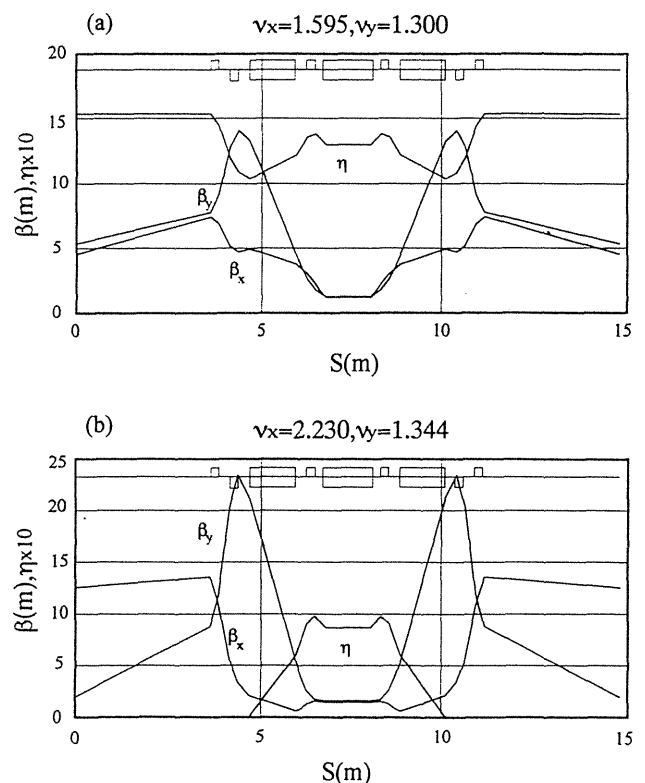


Fig.8 Betatron and momentum dispersion functions in the old mode (a) and the new mode (b).

Table 2 Calculated machine parameters of the storage ring NIJI-IV at 300 MeV

Parameters	Old mode	New mode
Betatron tune ν_x	1.595	2.230
ν_y	1.300	1.344
Momentum compaction factor	0.251	0.0884
Natural emittance [m rad]	3.988×10^{-7}	4.913×10^{-8}
Relative energy spread	2.13×10^{-4}	2.28×10^{-4}
Bunch length [mm]	35	22
Damping time τ_x [msec]	178	113
τ_y [msec]	99	99
τ_s [msec]	41	47
Chromaticity ξ_x	-1.61	-3.37
ξ_y	-2.22	-4.82

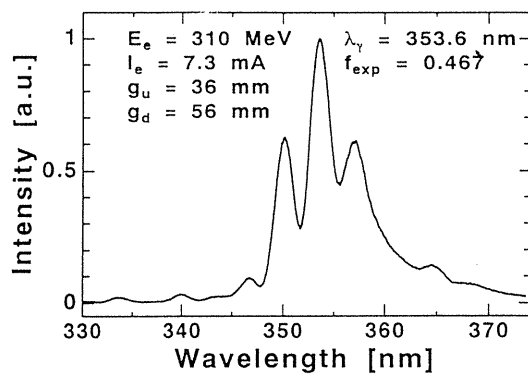
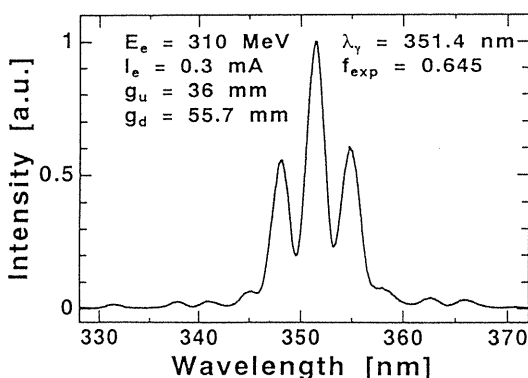
(a) Old Tune ($\epsilon = 3.99 \times 10^{-7}$ m·rad)(b) New Tune ($\epsilon = 4.13 \times 10^{-8}$ m·rad)

Fig.9 Spontaneous-emission spectrum at around 350 nm in the old mode (a) and that in the new mode (b).

述の2段階RF-KO方式では、入射中にそれを行ってもバンチ当たり約15mAが限度であり純度も低い。そこで、リングへの入射器であるリニアックの電子銃と入射部を改造して2ns程度のマクロパルスを発生させ、それを加速してリングの1バンチにのみ入射するための準備を行っている¹¹⁾。図10はそのブロック図である。新しい電子銃のカソードはEIMACのY646である。D-MOS FETとsnap-offダイオードを用いてクリップラインで2nsのパルスを発生させるが、これを蓄積リングの加速高周波を1/16に分周して遅延させたパルス(バンチ指定)でトリガしてリングの一つのバンチと同期させる。システムは大体完成し、現在ベンチ・テストを行っている。図11は、アモルファス・コア・モニタで観測された電子銃からのビームパルス列とひとつのビームパルス(b)を示している。リングのバンチ間隔5ns程度に対して電子銃からは2ns程度のパルス幅が得られており、1バンチのみへの入射が可能であることがわかった¹¹⁾。これからエミッタンス等の測定をして、結果がよければ従来の入射システムと交換する予定である。

一方、RF-KOシステムも改良しつつあり、従

ETL LINAC "TELL"

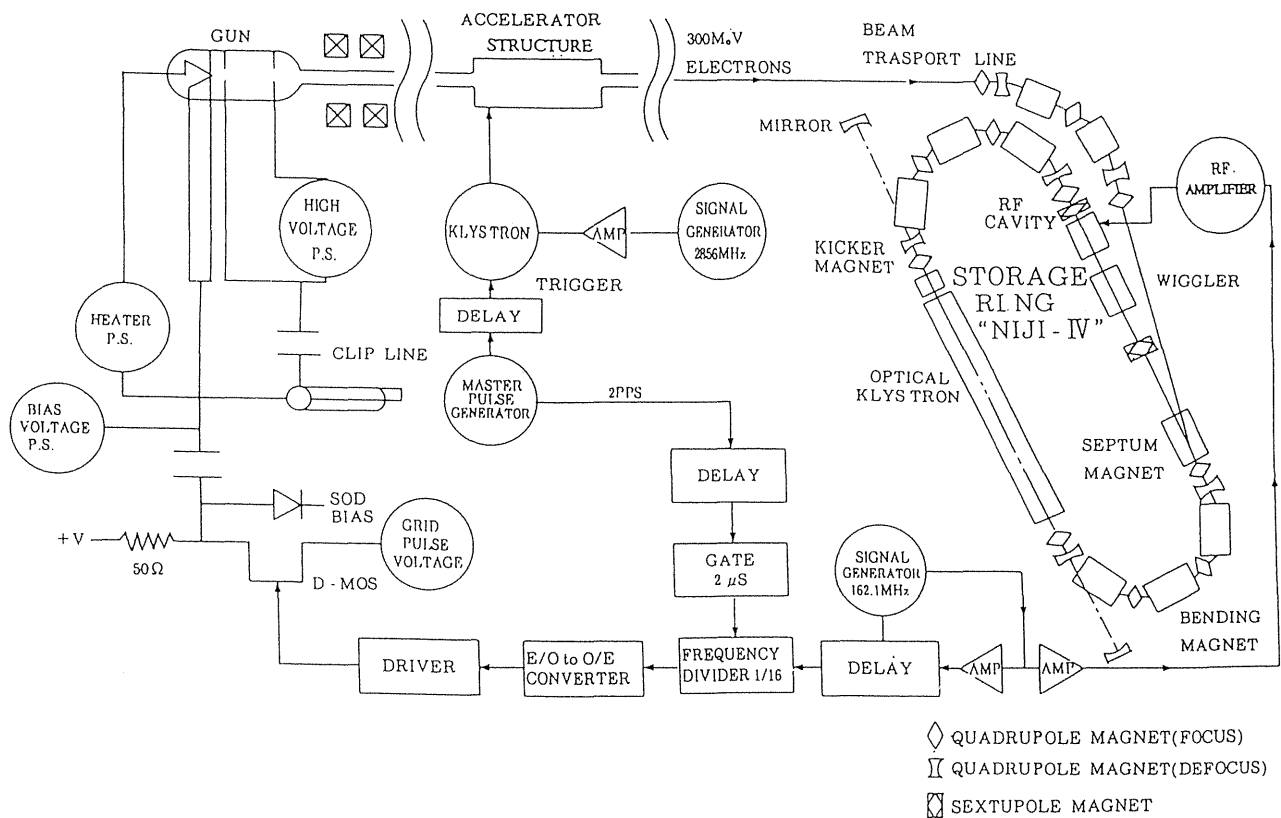
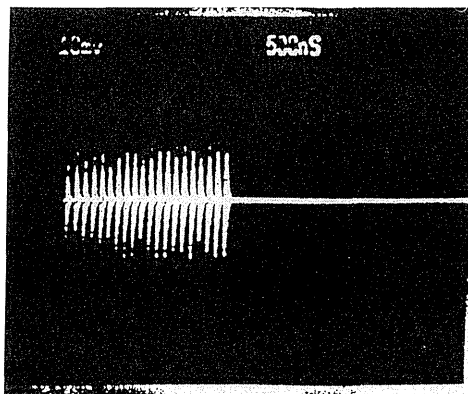


Fig.10 Schematic diagram of the single-bunch injection system.

(a)



(b)

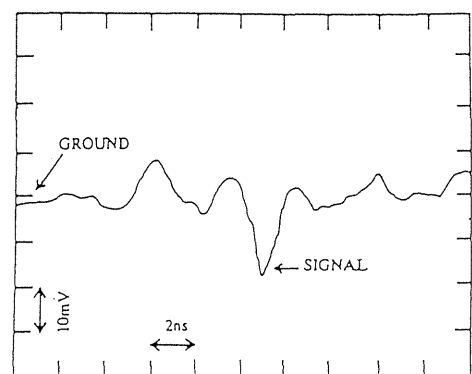


Fig.11 Time structure of the electron beam from the new gun measured by an amorphous-core monitor: a beam train (a) and a single pulse (b).

来の2段階法から1段階で行うシステムを試験している¹²⁾。図12は、TERASにおける新しいRF-KOシステムの各段階での波形の写真である。aとbはリングの加速周波数を各々1/2と1/16に分周したもので、これらを加算するとcの波形が選られる。cとベータトロン周波数をミキサで混合するとdが得られ、これを広帯域増幅器で増幅してRF-KO電極に印加するが、システム全体の結果的な波形はeの様になってしまう。これでも1バン

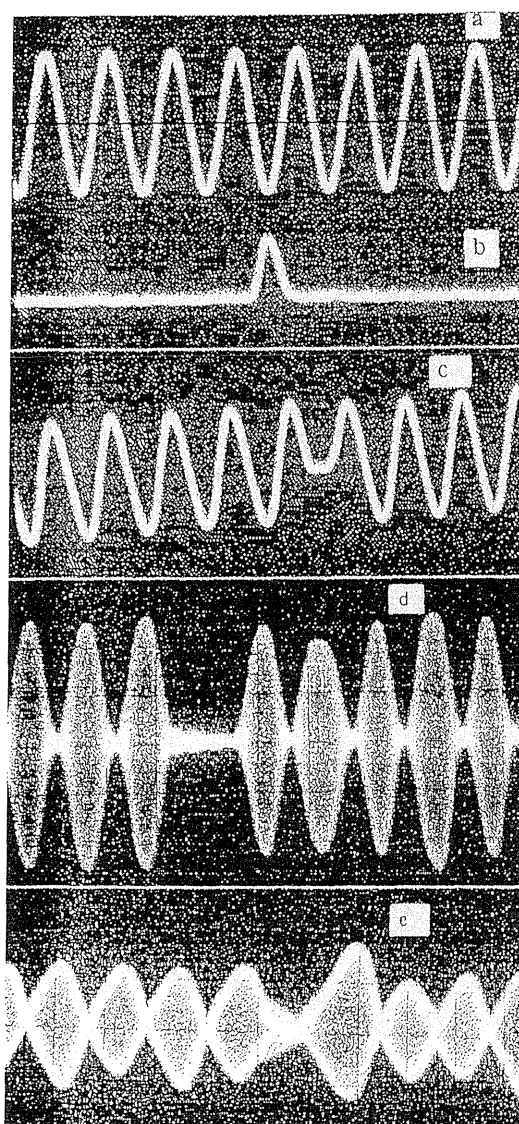


Fig.12 Waveforms of the new RF-KO system: 1/2-frequency signal(a), bunch-selection signal (b), a+b(c), the RF-KO signal modulated by the signal c(d), and the signal passing through the whole system.

チ・モードは得られ、TERASでは実際に実験に使用されている。NIJI-IVでも現在この方法を試験中であり、ある程度の成功は納めている。この方法は、上記の1バンチ入射の後その純度を高めるのに有効であろうと期待している。

さらに、四重極電磁石の収差を補正するための六極電磁石も準備している。一般にリング中の蓄積ビームの断面は偏平であるが、一方TEM₀₀モードで共振しているレーザーの断面は円形である。従って両ビームの重畳が少なく、その分FELゲインが低くなる。そこで、NIJI-IVではskew四重極電磁石を用意して電子ビームのプロフィールを円形に近くする実験も行っている。以上の準備は着実に進んでおり、NIJI-IVのFEL専用リングとしての性能は向上しつつある。

6. おわりに

以上、FEL専用蓄積リングNIJI-IVの現状について述べてきた。高エネルギー研のフォトン・ファクトリーや建設中のSPRING-8等は共同利用のための多目的な大型の施設として国あるいは地域に一つは必要であろう。一方、小型リングは逆に単能に近いものが志向される傾向にある。NIJI-IVに続いて米国Duke大学では、中型のFEL専用のリングを完成させつつあり、またリニアックも国内の原研やFEL研の様にFEL専用のものの数が増加しつつある。従来FELの実験は既設の加速器に寄生して行われることが多く、電総研のTERASでの実験もその例であったが、FELからの加速器への要求には厳しいものや特殊なものがあり、最近では逆にそれが加速器の進歩を促していることも事実である。

なお、NIJI-IVではもちろんシンクロトロン放射を利用することも可能で、将来はFELとシンクロトロン放射を併用する利用実験も可能である。NIJI-IVの様なリングは小型なので将来産業用に利用される可能性もある。現在の入射器である電総研リニアックは、リングへの入射のみでなく低速

陽電子線の発生・利用等多目的であるために比較的大型であるが、リングへの入射専用であれば相当小型の入射器で足りる。

最後に、NIJI-IVの設計段階と初期の立ち上げの段階に指揮をとり、その後も激励と色々な示唆を頂いている富増多喜夫博士（現^(株)自由電子レーザー研究所）に感謝の意を表す。本研究の一部は科学技術庁の「原子力基盤技術研究」の中の「総合的研究」で行われている。

文献

- 1) 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**, 705 (1990).
- 2) T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, T. Tomimasu, T. Noguchi, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, and H. Ohgaki: Nucl. Instr. Meth., **A309**, 343 (1991); 山崎鉄夫, 山田家和勝, 杉山卓, 大垣英明, 富増多喜夫, 野口勉, 三角智久, 千脇光國, 鈴木良一：放射光，**3**, 371 (1991).
- 3) M. Kawai, K. Aizawa, S. Kamiya, M. Yokoyama, Y. Oku, K. Owaki, H. Miura, A. Iwata, M. Yoshiwa, T. Tomimasu, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Yamazaki, K. Yamada, T. Mikado, and T. Noguchi: Nucl. Instr. and Meth., **A318**, 135 (1992).
- 4) 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., p.347 (1989); H. Ohgaki, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Mikado, R. Suzuki, and T. Tomimasu, *ibid.*, p.284 (1989).
- 5) 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: Nucl. Instr. Meth. **A331**, 27 (1993).
- 6) T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Tomimasu, and M. Kawai: Nucl. Instr. and Meth., **A318**, 142 (1992).
- 7) M. Yokoyama, M. Kawai, K. Owaki, S. Hamada, K. Aizawa, Y. Oku, A. Iwata, M. Yoshiwa, T. Yamazaki, S. Sugiyama, H. Ohgaki, K. Yamada, N. Sei, T. Mikado, T. Noguchi, R. Suzuki, M. Chiwaki, and T. Tomimasu: Nucl. Instr. and Meth., **A331**, ABS34 (1993).
- 8) 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 Symp. on FEL, IHEP, Beijing*, (1993), *to be published*.
- 9) T. Yamazaki, K. Yamada, S. Sugiyama, H. Ohgaki, N. Sei, T. Mikado, T. Noguchi, M. Chiwaki, R. Suzuki, M. Kawai, M. Yokoyama and S. Hamada.: *Proc. 15th Intern. FEL Conf., Hague* (1993), *to be published*.
- 10) K. Yoshikawa: *Private communication*.
- 11) M. Yokoyama, M. Kawai, S. Hamada, K. Owaki, T. Yamazaki, T. Mikado, K. Yamada, N. Sei, S. Sugiyama, H. Ohgaki, T. Noguchi, R. Suzuki, M. Chiwaki, and T. Tomimasu: *Proc. 15th Intern. FEL Conf., Hague* (1993), *to be published*.
- 12) H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, N. Sei, T. Noguchi, and T. Yamazaki.: *Proc. 9th Symp. on Acc. Sci. and Tech.*, KEK, p.407 (1993).