

自由電子レーザーラボ (Free Electron Laser Lab.)

研究項目：自由電子レーザー先端技術に関する研究
研究期間：平成11年度～15年度

1. 当該研究の背景

自由電子レーザー(Free Electron Laser, FEL)は、近年多方面に利用されつつあるシンクロトロン放射(放射光)にレーザーの持つコヒーレンスとハイパワーを付加したものと考えられ、従来型のレーザーと異なり、特定のレーザー媒質を用いず真空中を走る高エネルギー電子ビームを、アンジュレータと呼ばれる周期磁場発生装置で蛇行させることにより光を発生・増幅する。このため原理的にはマイクロ波からX線に至る広大な波長域において、連続波長可変性を有する、ある意味で理想的なコヒーレント光源となる可能性を持っている。FELが実用化できれば、従来型レーザーと相補い合いながら、長波長域での物性研究や医療、環境技術への利用の他、短波長域では精密な波長選択性を生かした、原子や電子のエネルギー状態の研究、光化学反応の制御による新物質の創製等、幅広い分野で応用できる画期的なツールとなるものと思われる。

FELは1977年、スタンフォード大学(米国)の超電導リニアック(SCA)を用いて赤外域(3.4 μm)で世界初の発振に成功¹⁾、その後1983年にはLURE(フランス)で電子蓄積リング(ACO)を用いて可視域(650nm)発振に成功²⁾する等、FELの可能性が示され、世界的に研究が始められるようになった。電総研では1981年に、国内で2番目の放射光発生用(第2世代)の小型電子蓄積リングTERASが完成し、これに伴って1984年頃からFELの基礎研究が、また1989年からTERASを用いた可視域のFEL発振の研究が開始され、更にFEL専用小型蓄積リングNIJI-IVの開発とこれを用いた紫外域のFEL研究へと発展し、現在に至っている。

現在世界で稼働している蓄積リングFELには、デューク大学(米国)のOK-4(413-194nm)、LURE(フランス)のSuper-ACO(630-300nm)、ドルトムント大学(ドイツ)の

DELTA(470-420nm)、トリエステ・シンクロトロン(イタリア)のELETTRA(356-220nm)、そして国内では電総研のNIJI-IV(595-212nm)、分子研のUVSOR(480-239nm)がある。発振波長は遠紫外域に達しており、更に真空紫外化、安定化、高出力化の研究が進んでいる。FELの真空紫外化のためには電子ビームの高品質化に加えて高いピーク電流が必要となるため、殆どの蓄積リングは周長100-250m、エネルギー1-2GeV程度の中規模のものとなっているが、電総研では将来の産業利用を視野に入れて、周長30mエネルギー0.3GeVと非常にコンパクトなリングを採用しているのが特徴となっている。

2. これまでの研究経過

電総研では当初、シンクロトロン放射発生用として稼働を始めた蓄積リングTERASを用いてFEL研究をスタートさせた。TERASはアンジュレータを設置するための直線部が短いことや、低エネルギー広がり、低エミッタンス、高ピーク電流といったFELで必要となる電子ビームの特性が十分ではなく、FEL発振を実現することは容易ではなかったが、微少ゲイン測定技術の開発^{3,4)}や、その後の超低損失光共振器関連技術^{5,6)}の開発とも相まって、1991年3月、可視域(598nm付近)のFEL発振が実現し^{7,8)}、これがわが国初のFEL発振となった。更に短波長への波長域拡大を目指して、より大きなレーザーゲインを得るため、FEL専用の蓄積リングNIJI-IV*が開発された。NIJI-IVの開発は1990年に始まり翌1991年には初めてのビーム蓄積に成功した。これに並行し開発した長尺の光クライストロン(ETLOK-II)を導入することにより、1992年にはTERASに次いで可視FEL発振が実現し⁹⁾、以後当所ではNIJI-IVシステムを改良・高性能化しながら、FEL発振波長

* NIJI-IVは世界初のFEL専用蓄積リングとして、当所と川崎重工の協力により開発されたもので、蓄積リングFEL技術に関して川重-電総研共同出願による特許7件(出願中を含む)、光学素子技術に関して電総研出願特許1件がある。

域を短波長へ順次拡大してきている。1994年にはリングの動作パラメータの変更とセプタム・マグネットの改造による、ビームの低エミッタンス化と蓄積電流の増加により350nm付近の近紫外域まで発振が可能となり¹⁰⁾、更に1998年には、電子ビーム不安定性(特に、ヘッド-テール不安定性)の抑制に成功して¹¹⁾、発振波長は212nm付近の遠紫外域まで一気に拡大された^{12,13)}。これは当時FELにおける世界最短波長を更新するものであった。現在更に真空紫外域を目指した研究を進めている。

3. 研究の現状

FELは大きく3つの要素から成っている。高エネルギーの電子ビームを供給する電子加速器、電子ビームを蛇行させ、光を発生・増幅するアンジュレータ、発生した光を閉じこめ増幅させることにより、光に指向性を与える光共振器である。電子(あるいは陽電子)加速器としては、蓄積リング、リニアック、静電加速器、パルスパワー装置等がレーザー波長に応じて使い分けられる。電子蓄積リングは、一般的にはリニアック等他の加速器より電子ビームのエネルギー広がりやエミッタンスが小さい等、ビーム質が良く、エネルギーも高いことから、短波長FEL発生に適している。電総研では、小型電子蓄積リングNIJI-IVを用いている。NIJI-

IVをベースとするFEL装置の模式図をFig.1に示す。アンジュレータは永久磁石を交互の極性で多数並べたものであるが、限られたスペースで出来るだけ高いゲインを得るため、中央部にエネルギー分散部を設けた構造(光クライストロン)になっている。光共振器には凹面鏡2枚で構成したファブリー・ペロー共振器を用い、小さいレーザーゲインを補う様、極めて低損失(高反射率)の誘電体多層膜ミラーが用いられている。リング1周の長さは約29.6mと蓄積リングとしては非常に小型で、また出来るだけ大きなレーザーゲインを発生するための長尺アンジュレータが設置出来るように、長直線部を持つレーストラック型となっている。最も長い直線部は7.25mで、ここに6.3mの光クライストロンが設置されている。FELを短波長で発振させるためには、電子ビームのピーク電流を高くし、短波長での大きな光共振器損失に打勝つ十分なレーザーゲインを発生しなければならない。このためには蓄積電流を増やすと共に、電子バンチを短くするのが有効である。レーザーゲインはまたアンジュレータを通過する電子ビームのエネルギー広がり(エミッタンス)に敏感である。NIJI-IVの低電流時のエネルギー広がり(エミッタンス)は 2.28×10^{-4} 及び 4.913×10^{-8} mradと計算され、十分小さい値となっているが、高電流時には、ビーム内に発生する不安定性によりこれらの値が増加し、結果

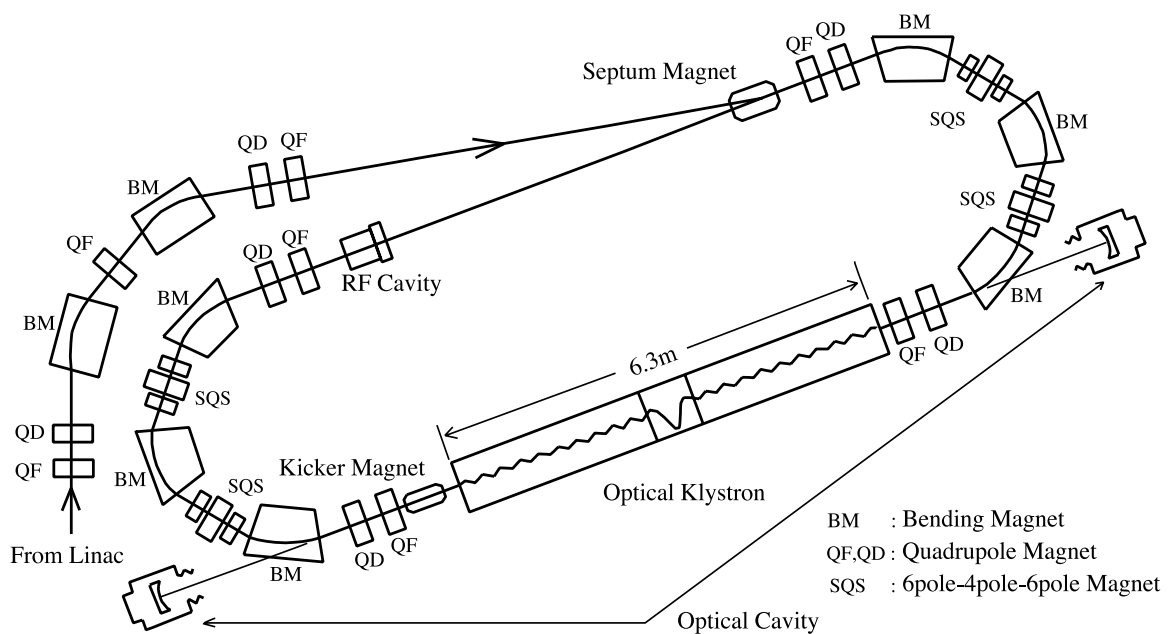


Fig.1 Schematic layout of the NIJI-IV FEL system.

的にレーザーゲインが増加しなくなる他、ビーム不安定性が成長して、ついには電子ビームが失われてしまう。従って高出力FELや短波長FELを目指す場合には、ビーム不安定性の抑制が不可欠となってくる。NIJI-IVではこのため、SQS電磁石¹¹⁾や、改良型RF加速空洞の導入に続いてリングの真空チェンバーの低インピーダンス化¹⁴⁾等を進めている。

現在NIJI-IV FELの発振波長域は可視から遠紫外域(595nm-212nm)にある。以下ではこの内、紫外域における発振特性について示す。紫外域では電子ビームエネルギーは310MeVに固定し、光クライストロンの磁石ギャップを変化させ、磁場強度の変化によりFEL波長を変化させている。この時光共振器ミラーには目的とする波長に最適化した誘電体多層膜を用いる。

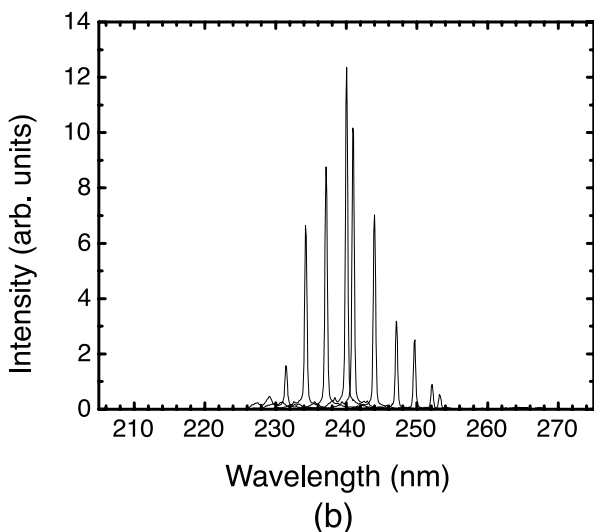
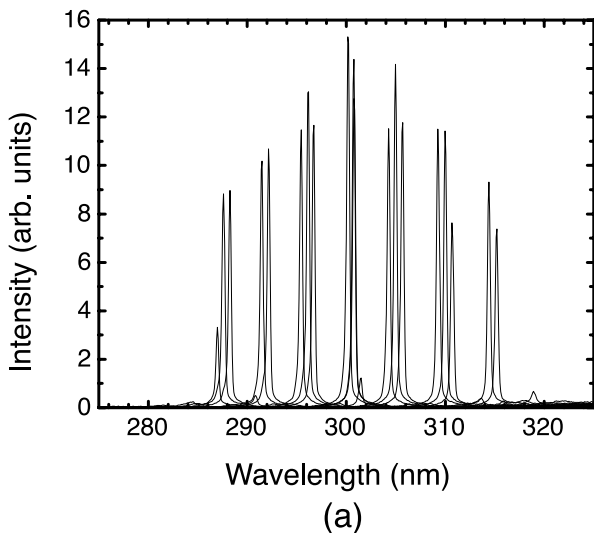


Fig.2 Typical FEL spectra around 300 nm (a) and 240 nm

Fig.2 (a),(b)は、300nm及び240nmで最適化した $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 誘電体多層膜ミラーを共振器に用いて得られたレーザー発振スペクトルである。これらのスペクトルは光クライストロン磁石列のギャップを変化させたときの発振線を重ねたもので、最適波長のまわりで自在にレーザー波長が変えられることを示している。ただし多層膜ミラーを使用しているため、波長チューニング範囲は最適波長付近の数10nmであり、またミラーの中心波長から離れると、ミラーの光反射特性に従ってレーザー出力は低下する。より広い範囲で波長チューニングを行うには、誘電体多層膜ミラーの最適波長を変えれば良いが、220nmより短波長では HfO_2 の光吸収が大きくなるためミラー材質を変える必要がある。Fig.3は共振器に $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ミラーを用いた時の214nm付近におけるレーザー発振線を示す。この波長域で得られるレーザーゲイン(ワンパス・ゲイン)は現状では2%程度であり、発振できるバンド幅は5nm程度と狭いが、 HfO_2 の光吸収のため限界となっていた220nmを切ることが可能となった。最短波長は212nmで、更に真空紫外域への短波長化も狙える状態となっている。

FELでは光共振器内の光パルスと電子バンチとの同期のずれ(デチューニング)がレーザー発振特性に大きく影響する。Fig.4に300nmにおけるデチューニング特性を示す。図の横軸はデチューニングの量、縦軸はレーザー出力を表す。同図には異なるデチューニング条件に対するレーザーの時間波形も同時に示してある。図よりレーザーはデチューニング $\pm 60\mu\text{m}$ (共振器長ずれ $\Delta l \pm 30\mu\text{m}$)の範囲で得られ、またレーザー時

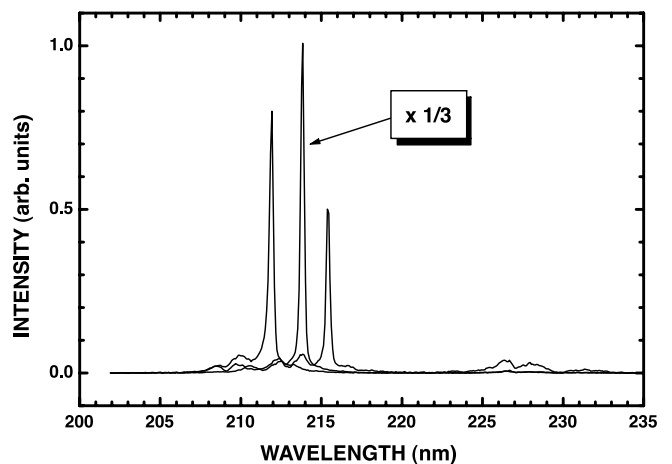


Fig.3 FEL spectrum around 214 nm. The highest peak is reduced by a factor of 1/3.

間波形はこの範囲内で変化することがわかる。蓄積リング型FELでは、リング内を電子が一定のバンチ間隔で連続的に回っているため、レーザー発振もCW(モードロック)発振するものと思われるが、実際にはレーザービルドアップに伴う電子ビームのヒーティングとその放射ダンピングによりゲインが変動し、レーザー発振も時間的に変動する。共振器が正確にチューニングされている場合は、光は増幅され続け、光のピークパワーは大きくなるが、これに伴うビームヒーティングも大きくなり、レーザーゲインが無くなって、発振は途切れる。これは従来型レーザーの緩和振動に対応し、原理的には定常発振に落ち着くはずであるが、実際はこれが光共振器の微小振動等と組み合わさって安定することなく続くことになる。これに対して、共振器のチューニングが僅かにずれると、発振のピークパワーは小さくなり、ビームのエネルギー広がりも小さく抑えられるため、CW的な発振が可能となる。ただしこの場合でも、実際にはパルス発振の集まりとなっていることに注意する必要がある。Fig.4に示された様なmsオーダーの時間構造(マクロ構造)の中には、更にリング内を回る電子バンチに対応した、100ns間隔で90ps[FWHM]程度の短パルス列(マイクロパルス)がある。マイクロパルスのピークパワーはFig.4の最適チュー-

ニング条件において200mW程度と現状では小さいが、電子エネルギーを上げることで増加でき、またマルチバンチでFEL発振できれば平均パワーを稼ぐことも可能となる。

Fig.5にCCDカメラで観測された240nmでのレーザースポットの強度分布を示す。光増幅は電子ビームの断面積(1.8mm×0.6mm程度)と光クライストロンの長さ(~6m)で決まる非常に細長い領域で起こり、かつゲインも小さいため、通常はTEM₀₀の基本横モードのみでの発振が観測される。観測されたスポットサイズよりレーザー光の発散角は波長213nmにおいて0.14mradと計算され、光共振器のパラメータによって決まる回折限界(0.13mrad)にほぼ一致する。

4. 今後の研究展開と予想される波及効果

自由電子レーザーは、従来型のレーザーに比べ格段に広い範囲で連続波長可変性を実現し得るレーザーであり、ここで示した蓄積リングやリニアック等各種加速器を用いて幅広い波長域で研究開発が行われている。特にマイクロ波から赤外域では比較的発振が得やすく、数ミクロンの波長域ではRFリニアックを用いた比較的小型のFELシステムが実現され、また超伝

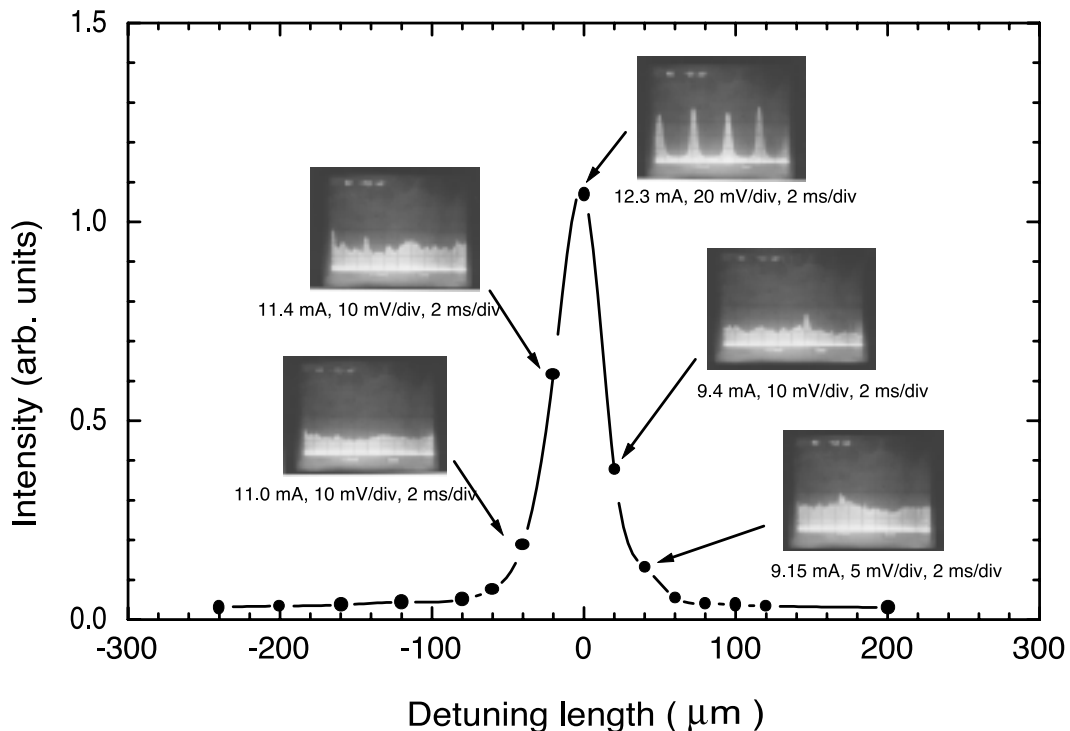


Fig.4 Laser output as a function of cavity detuning length at 300 nm. Laser waveforms under various detuning conditions are also indicated.

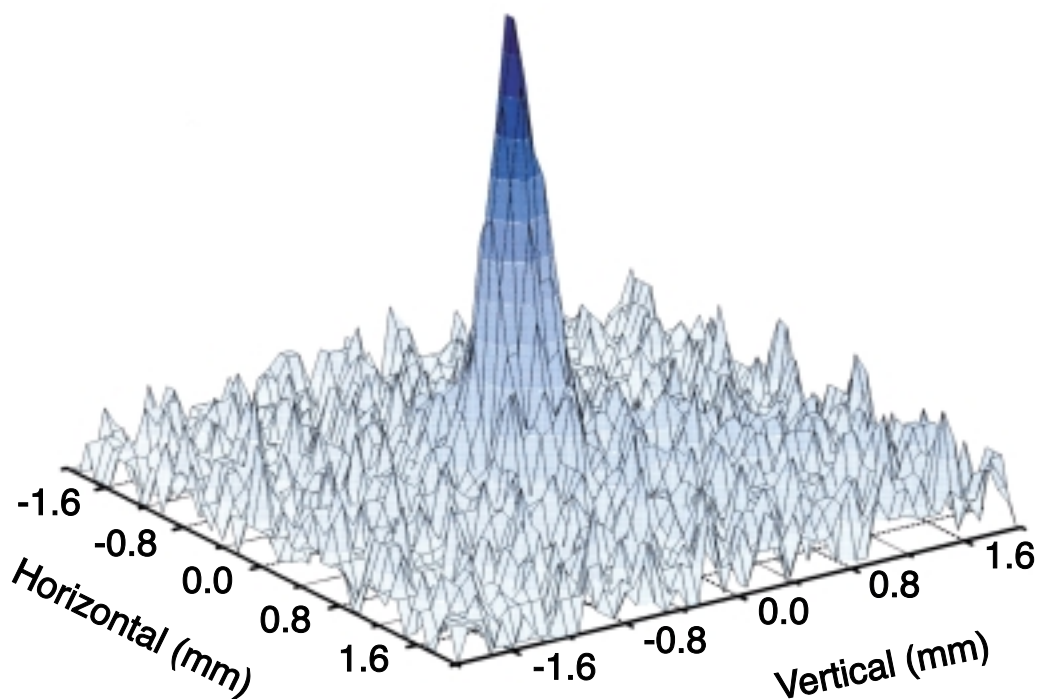


Fig.5 Typical lateral intensity profile at 240 nm.

導リニアックを用いることにより、既にkWオーダーの高平均出力CW FEL発生も可能となっており^{15,16)} FEL利用研究も盛んに行われつつある¹⁷⁾。可視より短い波長域では主に蓄積リングが用いられてきた。電総研のNIJI-IVの他、デューク大、ドルトムント大、トリエステ・シンクロトロン等で真空紫外域を目指した研究が進んでいる。

更に短波長のX線領域では、低損失の共振器の製作は難しいため、光共振器を使わず、非常に長いアンジュレータを用いてシングルパスでレーザー増幅を行うSASE法(Self Amplified Spontaneous Emission)を用いる必要がある。この場合はアンジュレータの設置スペースの制限から蓄積リングの使用は難しいため、高輝度大電流の大型リニアックを用いることになる。ドイツのDESY(Deutches Electronen Synchrotron)¹⁸⁾では、SASE法による数nmの軟X線FEL開発が始まっており、最近109nm付近での発振に成功したと伝えられている。

光共振器を用いる蓄積リングFELは、単色性やコヒーレンスの点でSASEに比べて優れていること、CW動作とパルス動作が共に可能であること、シンクロトロン放射やアンジュレータ放射と同期したレーザー光が容易に得られること等、励起・計測用光源として大きな利点を持ち、特に真空紫外域における波長可変レー

ザーとして極めて有用と考えられる。電総研自由電子レーザーラボでは、上述の様にコンパクトな蓄積リングを用いた高品質な真空紫外FELの開発を行っており、また世界でも初めての試みである、蓄積リングを用いた赤外域への長波長化も予定している。これらの研究により、コンパクトで非常に広い波長域をカバーするFELが実現できれば、基礎科学から産業まで幅広い分野で利用できる光ツールとして、21世紀の高度情報化社会、高齢化社会を支える技術開発に大きく貢献できるものと思われる。

参考文献

- 1) D.A.G. Deacon, L.R. Elias, J.M.J. Madey, G.J. Ramian, H.A. Schwettman, and T.I. Smith : Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 892.
- 2) M. Billardon, P. Elleaume, J.M. Ortega, C. Bazin, M. Bergher, Y. Petroff, M. Velghe, D.A.G. Deacon, J.M.J. Madey, in Free-Electron Generators of Coherent Radiation, edited by C.A. Brau et al. : SPIE453 (SPIE, Bellingham, WA, 1984) 269.
- 3) 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)

- 308.
- 4) K. Yamada, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Tomimasu, T. Mikado, M. Chiwaki, R. Suzuki, and H. Ohgaki : Nucl. Instr. and Meth. A304 (1991) 86.
- 5) K. Yamada, T. Yamazaki, T. Shimizu, N. Sei, and T. Mikado : Applied Optics, 34 (1995) 4261.
- 6) K. Yamada, T. Yamazaki, N. Sei, T. Shimizu, R. Suzuki, T. Ohdaira, M. Kawai, M. Yokoyama, S. Hamada, K. Saeki, E. Nishimura, T. Mikado, T. Noguchi, S. Sugiyama, M. Chiwaki, H. Ohgaki, and T. Tomimasu : Nucl. Instr. and Meth., A358 (1995) 392.
- 7) 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.
- 8) K. Yamada, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Tomimasu, H. Ohgaki, T. Noguchi, T. Mikado, M. Chiwaki, and R. Suzuki : Nucl. Instr. and Meth., A318 (1992) 33.
- 9) 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. and Meth., A331 (1993) 27.
- 10) T. Yamazaki, K. Yamada, N. Sei, H. Ohgaki, M. Kawai, M. Yokoyama, S. Hamada, S. Sugiyama, R. Suzuki, T. Noguchi, M. Chiwaki, and A. Iwata : Japanese Journal of Applied Physics, 33 (1994) L1224.
- 11) N. Sei, K. Yamada, H. Ohgaki, V.N. Litvinenko, T. Mikado, T. Yamazaki : Nucl. Instr. and Meth., A429 (1999) 185.
- 12) K. Yamada, N. Sei, T. Yamazaki, H. Ohgaki, T. Mikado, S. Sugiyama, M. Kawai, and M. Yokoyama : Japanese Journal of Applied Physics, 37 (1998) L1151.
- 13) K. Yamada, N. Sei, T. Yamazaki, H. Ohgaki, T. Mikado, S. Sugiyama : Proceedings of International Symposium on Environment-Conscious Innovative Materials Processing with Advanced Energy Sources (ECOMAP'98), Kyoto, (1998) 277.
- 14) 山田, 清, 大垣, 三角, 鈴木, 大平, 豊川, 山崎 ; 電総研彙報 , Vol.63 (No.11) (1999) 459.
- 15) E.J. Minehara, M. Sugimoto, M. Sawamura, R. Nagai, N. Kikuzawa, Yamanouchi, and N. Nishimori : Nucl. Instr. and Meth., A429 (1999) 9.
- 16) S. Benson, G. Biallas, C.L. Bohn, D. Douglas, H.F. Dylla, R. Evans, J. Fugitt, R. Hill, K. Jordan, G. Krafft, R. Legg, R.Li, L. Merminga, G.R. Neil, D. Oepts, P. Piot, J. Preble, M. Shinn, T. Siggins, R. Walker, and B. Yunn : Nucl. Instr. and Meth., A429 (1999) 27.
- 17) see for example, T. Tomimasu, E. Nishimura, T. Mitsuyu, and K. Awazu, eds. : Free Electron Laser and Its Application in Asia, Hirakata, 1997 (IONICS PUBLISHING CO., Tokyo, 1997).
- 18) J. Rossbach : Nucl. Instr. and Meth., A375 (1996) 269.

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数5名)

職員(4名) 山田家和勝* , 三角智久 , 大垣英明 , 清 紀弘
(量子放射部)

職員以外(1名) 山崎鉄夫(京都大学 量子放射部併任)

*ラボリーダ