

## 話 題

## 京都大学小型量子放射発生装置の現状

大垣 英明\*・紀井 俊輝・増田 開・吉川 潔・山寄 鉄夫

## Present Status of KU-FEL

Hideaki OHGAKI\*, Toshiteru KII, Kai MASUDA,  
Kiyoshi YOSHIKAWA and Tetsuo YAMAZAKI

## 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、小規模の施設での中赤外域自由電子レーザーの発生とその利用を目標に、小型量子放射発生装置 (KU-FEL) の建設を行ってきた。本装置の概略に関しては、2005年に本誌において報告している<sup>1)</sup>が、その内容は、小型加速器という特徴に主眼を置いて、概要のみを述べたものであり、詳細に触れなかった。最近、僅かとは言えレーザー光の増幅も確認し、現在、飽和を目指して研究を進めている。そこで本稿では、本装置の現状とともにレーザー増幅実験に関して、やや詳しく述べることにする。

## 2. KU-FEL 装置の建設

我々は1992年頃からリニアックベース FEL の基礎研究を開始したが、1995年頃から高周波電子銃を

始めとして、FEL 装置の建設・研究を開始した<sup>2)</sup>。本節では、その状況を述べる。

## 2.1 建屋

我々は当初、京大化学研究所の井上信氏、野田章氏等の御好意により、同研究所附属原子核科学研究施設 (現 先端ビームナノ科学センター) の加速器施設において FEL 装置の建設を開始し、加速実験を行っていた。しかしながら、将来的な利用までを考えた場合、どうしても時間とスペースに限界があるため、日本における核融合研究の象徴的な存在であるエネルギー理工学研究所の旧ヘリオトロン D 棟を整備して放射線遮蔽を追加すると共に、光・電子・イオンの複合的利用も視野に入れ、当研究所のイオン加速器グループと協力して「量子光・加速粒子総合工学実験棟」として完成させた。2004年に KU-FEL 装置の全面移転を終了し、再調整を開始した<sup>1,3)</sup>。

KU-FEL 施設の平面図を図 1 に示す。クライスト

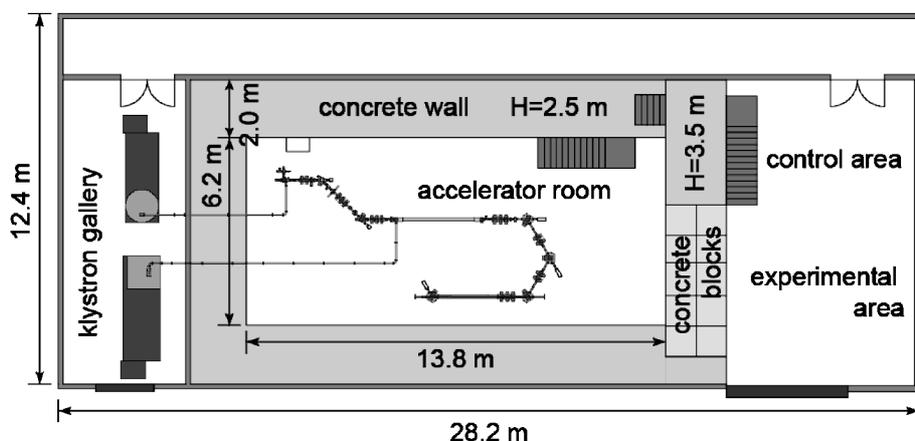


図 1 KU-FEL 施設平面図

\* 京都大学エネルギー理工学研究所 Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
(E-mail: ohgaki@iae.kyoto-u.ac.jp)

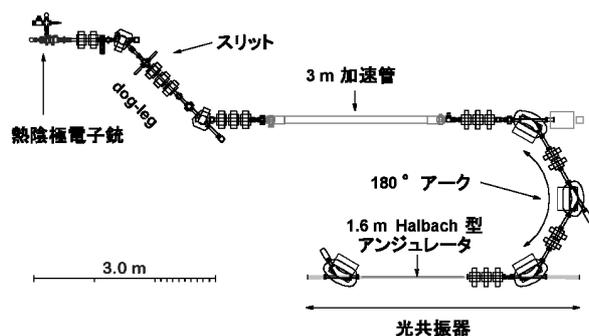


図2 KU-FEL 装置の概略図

ロン室, 制御室, FEL 計測と当面の利用実験スペースを含めた総面積は 350 m<sup>2</sup> であり, 加速器室の面積は 90 m<sup>2</sup> である. 遮蔽コンクリート壁の厚さは 2 m とした. 遮蔽扉は非常に高価であるため設置せず, 加速器室へは階段を昇降して入るようにしている. 大きな機器の搬入・搬出時は, コンクリート・ブロックを一時的に取外す. 但し, 予算の都合上, コンクリート壁の高さが 2.5-3.5 m に抑えられ, かつ天井からのスカイシャインの問題が生じるため, 加速器室にはコンクリート・ブロックによる局所遮蔽を施している. この遮蔽工事を完全に終了するのに, 約 2 年の月日を要した事は FEL 発振を遅らせる大きな要因となってしまった.

## 2.2 FEL 装置の現状

図 1 は, 加速器の設置状況も描き入れた図になっており, FEL 装置のみの概略図を図 2 に示している. 電子源は 4.5 空胴の S-バンド高周波電子銃であり, 日新電機製 10 MW モジュレータと Thales 製のクライストロン管によって 10 MeV 程度までの加速が可能である. 電子銃からの電子ビームは, アクロマティックな輸送系 (dog-leg と称す) を通って 3 m 加速管に入射される. 電子銃での加速エネルギーが高いので, 通常よく用いられるアルファ電磁石は使用せず, スリットで低エネルギー電子を除いている. 3 m 加速管では, 電子銃とは別の日新電機製 20 MW モジュレータと三菱製クライストロンによる高周波で最高で 40 MeV まで加速される. 加速管で加速された電子ビームは, 3 つの 60 度偏向電磁石と 2 対のダブルレットから構成される輸送系 (180 度アークと称す) でバンチ圧縮を受ける. またこの前後にそれぞれトリプレットを置いてアンジュレータパラメータに電子ビームをマッチさせる<sup>4)</sup>. アンジュレータは大阪大学自由電子レーザー研究施設より借用している 1.6 m の Halbach 型アンジュレータであり, K 値は約 1 となって

表 1 レーザー増幅実験時の電子ビームパラメータ

エネルギー分散	0.5%
バンチ長 (rms)	600 $\mu\text{m}$ (2 ps)
マクロパルス平均電流	90 mA
バンチ電荷	34 pC
ピーク電流	17 A
ビーム半径 (x 方向)	0.6 mm
ビーム半径 (y 方向)	0.4 mm
規格化エミッタンス(x)	3.5 $\pi\text{mm mrad}$
規格化エミッタンス(y)	3.5 $\pi\text{mm mrad}$
Twiss parameter $\alpha_x$	3.6
Twiss parameter $\alpha_y$	0

いる. 電子ビームはアンジュレータを通過したのち, ビームダンプへダンプされる.

## 3. KU-FEL におけるレーザー増幅

KU-FEL でのレーザー初発振を目指して, 平成 19 年度から実験を開始した. この発振実験に用いた電子ビームのパラメータを表 1 に示す. 電子エネルギーは 25 MeV を選んだ. これは, 電子ビームが低エネルギーであるほど FEL ゲインは高いものの, レーザーの発振波長は長くなり, 回折損失と呼ばれる真空ダクトでの光損失が大きくなるため, シミュレーションにより実効ゲインの最も大きくなる電子エネルギーやその他のビームパラメータを選んで<sup>5)</sup>. バンチ長は先に述べたように, 180 度アークでのバンチ圧縮により 2 ps 程度になっている. 高周波電子銃のカソード材料は, 当初よりディスペンサータイプのタングステンであったが, ピーク電流がどうしても 10 A から増えず, 増幅実験は難航したが, 平成 19 年秋に LaB<sub>6</sub> に変更した結果, ピーク電流 17 A の電子ビームを生成することが可能となった. この値にしても, リニアック型 FEL では低い値であり, その理由は次の章で述べるような, 熱陰極型高周波電子銃の backbombardment 現象に起因している.

ビーム電流に不満が残るものの, シミュレーションによれば, 1 桁以上の光の増幅が望めるという事で, 電子ビームのコンディショニングと光共振器のパラメータ探索を繰り返すこと約 2 か月で図 3 のような自発光出力の約 50 倍の増幅光を観測した. 増幅光の波形の立ち上がりから FEL ゲインは 16% で, 立下りから共振器損失 2.8% という値を得た. 図 4 に増幅光のスペクトルを示す. 増幅光が中心波長 12.4  $\mu\text{m}$  を持ち, 自発光とは大きく異なる高単色性の光である

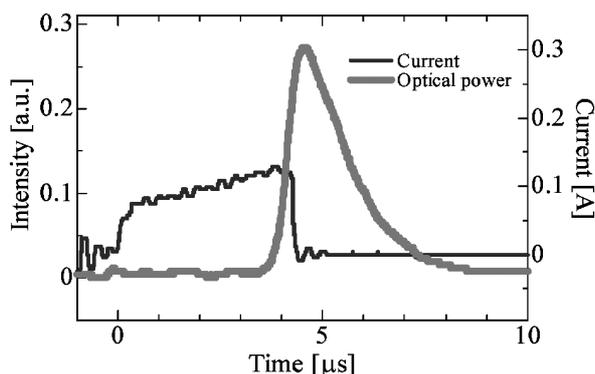


図3 電子ビーム波形と増幅光の出力波形

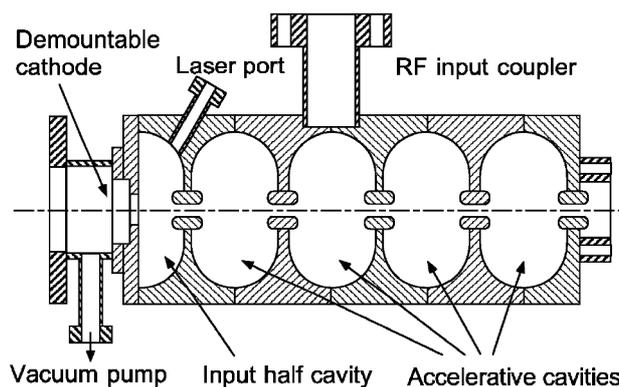


図5 4.5空胴高周波電子銃の構造

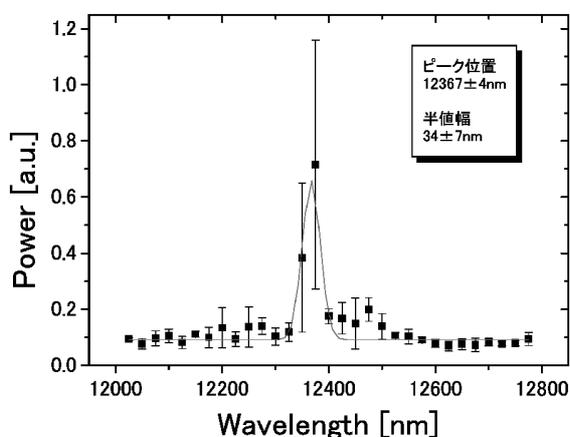


図4 増幅光のスペクトル

ことが確認できる。これと同時に、同図の測定誤差の大きさから、増幅が非常に不安定である事が読み取れる。利用に供することが可能な光を得るためには、電子ビームのピーク電流を、エネルギー分散を維持しつつ、最低 40 A 程度まで増やす必要がある。ピーク電流の大幅な増加に関して、次節後半に述べるような3極管構造の導入や、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の大学支援事業制度により現在進めているマルチバンチ光陰極高周波電子銃の導入のような根本的な解決が必要だと考えている。

このように、FEL 発振が可能になった原動力として、熱陰極型 4.5 空胴高周波電子銃における backbombardment 現象に対する研究を挙げる事ができる。以下にこれまで KU-FEL で行われてきた高周波電子銃に関する研究について簡単に紹介する。

#### 4. 熱陰極高周波電子銃研究

KU-FEL では、小型かつ簡便、安価な装置を目標に熱陰極型 4.5 空胴高周波電子銃を選択した<sup>6)</sup>。その

構造を図 5 に示す。熱陰極高周波電子銃は、光陰極型のように高価で複雑なレーザーシステムが不要であり、DC 電子銃のようにバンチャも不要であり、小型で経済的、かつ簡便な装置に最適である。しかしながら、backbombardment 現象により、マクロパルス幅が 4  $\mu$ s 程度以下に制限されるという深刻な問題が存在する。これは、陰極から放出された電子の一部が減速位相に入ってしまう、逆流して陰極に衝突して陰極の温度が上昇して、放出電子数が増加し、ビームローディングの増加によりマクロパルスの後半で電子エネルギーが下り、また高周波の共鳴条件から外れる現象である。我々の 4.5 空胴電子銃の場合は、特にこの効果に敏感で、当初は dog-leg を通過する電子ビームのマクロパルス幅は 1  $\mu$ s 程度であった。

我々は、この逆流電子を定量的に評価するために、先ず赤外放射温度計で陰極表面の温度を測定し、1 pps の場合のマクロパルス間隔 1 s の間の温度変化を測定することに成功した<sup>7)</sup>。その結果と、当所において開発した KUBLAI<sup>8)</sup>や PARMELA 等の粒子ビームシミュレーション、熱計算モデル等から、マクロパルス幅の数  $\mu$ s の中での温度変化を推測した<sup>9)</sup>。

Backbombardment 現象をある程度解明して、しかる後、外部磁場の適用<sup>10)</sup>や小径の陰極の使用<sup>11)</sup>等の解決策を試みたが、これらの方法では、残念ながら根本的解決には至っていない。外部磁場によって逆流電子を曲げる方法は、頻繁に使われる方法であるが、加速されるべき電子も曲げられるので、印加磁場の強度に妥協が必要である。我々の 4.5 空胴電子銃の場合には空胴間のアイリス径が僅か 8 mm であるため、有効な強度の磁場を印加できず、現時点ではこの手法はあまり有効では無い。

そこで、我々は電子銃に供給する高周波電力をビームローディングの増大するマクロパルス後半で大きく

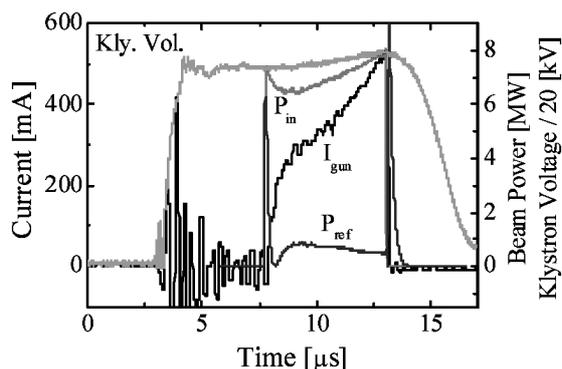


図6 電子銃へのAM変調された高周波電力波 ( $P_{in}$ ), 電子銃からの反射電力 ( $P_{ref}$ ), 電子銃からの引き出し電流 ( $I_{gun}$ ), およびクライストロンへの印加電圧 ( $V_k$ ) の時間構造

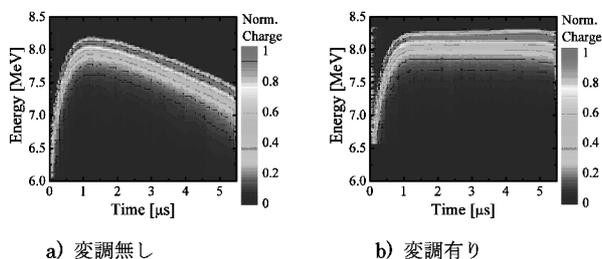


図7 出力電子ビームエネルギー分布の時間発展. 電力変調によりエネルギーはマクロパルス後半まで一定に保たれている

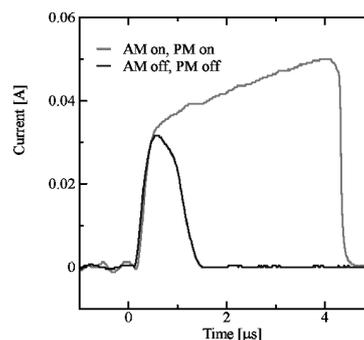


図8 電力変調前後の加速管への入射電子ビーム電流波形. 電力変調によりマクロパルス幅は800 nsから4 msへと増加している

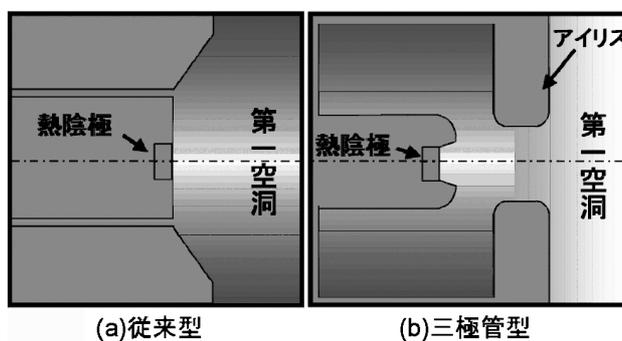


図9 従来型(a)と三極管型(b)電子銃の陰極付近の拡大模式図

するように調整して, 前述の電子エネルギーの低下を補償することを試みた<sup>12)</sup>. 図6に示すように, 電子銃からの引き出し電流 ( $I_{gun}$ ) の増大にあわせクライストロンへの印加パルス電圧 (Kly. Vol.) を制御しエネルギーの低下を補償するような入射電力 ( $P_{in}$ ) を電子銃へ入射した. その結果, 図7(a)(b)に示すように, マクロパルス後半でのエネルギー低下は抑制された. また, 図8に示すように, マクロパルス幅は800 nsから4  $\mu$ sと大幅に増大した.

我々は更に, 高周波電子銃に等価回路モデル<sup>13)</sup>を適用し, 前述の粒子シミュレーションコードと1次元熱伝導モデルを併用することにより, 電子銃からの反射高周波電力波形が実験結果をよく再現していること, および, 電子銃に印加する高周波電力波形が適切であれば, ピークエネルギーの劣化はマクロパルスの8  $\mu$ sに互って100 keV以下に抑えられることを示した.

以上の手段は成功を収めたが, 電子逆流現象を根本的に抑えるものではなく, いわば対症療法である. 電子逆流を解消する1つの方法として, 三極管型熱陰

極高周波電子銃が提案されている<sup>14-16)</sup>. これは, 図9(b)に示すように, 熱陰極を備えた追加小空洞を従来の熱陰極に換えて設置し, 追加空洞と電子銃本体の空洞の電界を各々独立に制御し, 陰極からの電子の引き出しと本体空洞での加速とを独立に行うものである. この追加小空洞に誘起する電界の位相と振幅を適切に調整し, 第1空洞で電子が逆流しない位相で電子を引き出すことを目標とする.

我々の数値シミュレーションによって, 陰極の位置と追加空洞の高周波の位相を最適化すれば逆流電子は大幅に減少することが判明したが, そのような位相では同時に横方向エミッタンスの増加が避けられないことが分かった<sup>15)</sup>. そこで, wehnelt構造を採用して, 形状の最適化を試みた. その結果, 40度という非常に深いwehnelt電極角度を用いれば, 表2に見られるように, 電子銃出口で横方向エミッタンスを維持したまま逆流電子の電力  $P_{back}$  を9割削減, ピーク電流  $I_{peak}$  を10倍程度にすることが可能であることが判明した<sup>17)</sup>. ここでは, 陰極表面電流密度は80 A/cm<sup>2</sup>, 追加小空洞の空洞電圧は30 kV, 電子銃の本体空洞の

表2 従来型と三極管型の電子ビームの性能の比較

	conventional	triode
$P_{\text{back}}$ [kW]	36	3.6
$I_{\text{peak}}$ [A]	17	114
$\epsilon_{n,r}$ [ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]	2.5	2.0
$\epsilon_z$ [psec $\cdot\text{MeV}$ ]	0.046	0.012
$B$ [A/ $(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})^2\cdot\text{keV}$ ]	0.27	1.6

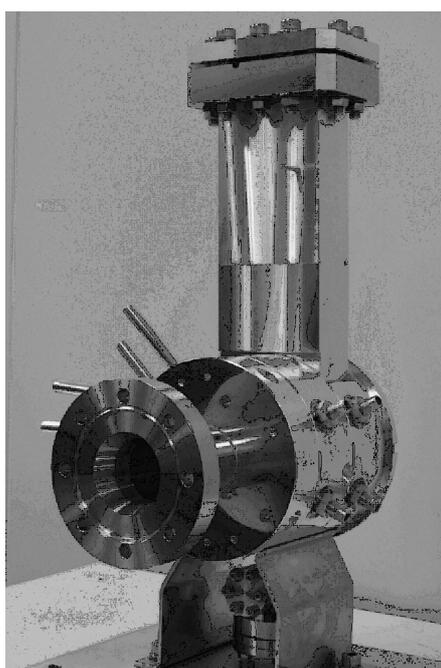


図10 1.5 空洞光陰極高周波電子銃

4.5 空洞の空洞電圧は 10 MV とした．表中  $\epsilon_{n,r}$  と  $\epsilon_z$  は各々横方向，縦方向の rms エミッタンスである．

我々は，実機製作に向けて更に，高周波電源との結合定数や  $Q$  値の最適化を行い，製作を開始している．前述の電子エネルギー補償を併用することで，クライストロン高圧電源の仕様上限である 10  $\mu\text{s}$  までの長パルス化を目標としている．

一方，短パルスの FEL や THz 放射を発生させるためには，1 kA を超えるピーク電流の電子ビームの生成が期待できる光陰極高周波電子銃も魅力的である<sup>18)</sup>．平成 17 年度からの高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の大学支援事業により，電子銃の製作をおこなうことができた (図 10)．

現在のところ，陰極材料としては，量子効率と寿命を勘案して， $\text{Cs}_2\text{Te}$  を予定している．高周波源は，随時熱陰極電子銃のものと切替えて使用する予定で，分

岐のための機器は既に準備してある．また，最近ドライブレザーを入手する目処が立ったので，最初は単バンチで，次いで複数バンチを目標にして試験を進めて行く予定である．

## 5. おわりに

以上，京都大学エネルギー理工学研究所における中赤外自由電子レーザー装置の開発状況とレーザー増幅実験について述べた．紙面の関係上ここに入りきれない研究も幾つか有り，特にビーム診断に関する研究<sup>19)</sup>は FEL 増幅のための高輝度電子ビーム生成には不可欠なものである．また装置の小型化を目指して，新型アンジュレータの研究<sup>20)</sup>も精力的に進めている．

FEL 増幅の飽和を目指した研究を更に続けているが，今更中赤外 FEL かという批判もしばしば耳にする．しかしながら中赤外 FEL を使うことで，エネルギー開発に有用な新しい機能材料が開発可能であると我々は確信している．今後はこれを実証して行くために加速器開発のみならず，利用研究に関して，色々な方々の協力を仰ぎつつ進めて行く予定である．

また，大学の研究所としては研究成果をあげることは勿論であるが，人材育成も重要な使命である．これまでの約 10 年間で，我々のグループからは 4 名の博士，27 名の修士，5 名の学部学生を社会に送り出すことができた．この中で加速器研究の世界に留まることが出来たのは，残念ながら 3 名であり，この加速器の世界に対しては，十分な貢献が出来たとは言いがたい．しかしながら，多くの学生が架台の作成，ハンダ付けや電気配線，水配管等々の下支え作業を多く含む装置の組み上げを通じ，加速器研究を行う事で，問題解決能力を自ら習得した結果，様々な方面に於いて現在活躍していると確信している．また一方では，加速器の研究開発が社会からもっと魅力的なものに映るように，更に努力を続けて行く事が必要だと感じている．その意味でも加速器学会の役割・活動は特に重要であり，今後の学会の発展に大きく期待すると共に，微力ながら協力を惜しまないつもりである．

京都大学での FEL 開発に関しては，言うまでもなく当研究グループのみの力では不可能であり，京大化学研究所，産業技術総合研究所，大阪大学，日本原子力研究所，高エネルギー加速器研究機構，高輝度光科学研究センター，東北大学，早稲田大学，日新電機(株)，(株)AET，等々の皆様に，多大なご協力・ご援助を頂いている．この場を借りて感謝の意を表させて頂く．

## 参考文献

- 1) 山崎鉄夫, 加速器, **2**, p. 251 (2005).
- 2) T. Yamazaki, H. Ohgaki, K. Masuda, T. Kii, S. Amazaki, T. Horii, H. Toku and K. Yoshikawa, Proc. 23rd Intern. Free Electron Laser Conf., Darumstadt, Germany, M. Brunken, H. Genz and A. Richter, ed., (2002) pp. II-13-14; 山崎鉄夫, 大垣英明, 紀井俊輝, 増田開, 留高烈, 山根功士朗, 松村慎也, 高松輝久, 督寿之, 吉川潔, Proc. 27th Linear Acc. Meeting in Jpn., Kyoto Univ. p. 12 (2002).
- 3) T. Kii, K. Hayakawa, S. Murakami, H. Zen, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, Proc. 26th Free Electron Laser Conf., Trieste, Italy p. 447 (2004).
- 4) H. Ohgaki, I. Tometaka, K. Yamane, T. Kii, K. Masuda, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, *Nucl. Instrum. Methods.*, A507, p. 150 (2003).
- 5) S. Sasaki, H. Zen, T. Shiiyama, T. Kii, K. Masuda and H. Ohgaki, Proc. of FEL2007 pp. 394-397 (2007).
- 6) K. Masuda, R. Ikeda, T. Yamaguchi, T. Kii, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, Proc. 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 57 (1999).
- 7) T. Kii, T. Yamaguchi, R. Ikeda, Z. Dong, K. Masuda, H. Toku, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, *Nucl. Instrum. Methods.*, A475, p. 588 (2001).
- 8) Y. Yamamoto, T. Inamasu, K. Masuda, M. Sobajima, M. Ohnishi, K. Yoshikawa, H. Toku and E. Tanabe, *Nucl. Instrum. Methods.*, A393, p. 443 (1997); K. Masuda, K. Yoshikawa, M. Ohnishi, Y. Yamamoto, H. Toku, M. Sobajima and J. Kitagaki, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 46, p. 1180 (1998).
- 9) T. Kii, K. Masuda, S. Amazaki, T. Horii, H. Toku, K. Yoshikawa, H. Ohgaki and T. Yamazaki, *Nucl. Instrum. Methods.*, A483, p. 310 (2002).
- 10) T. Kii, I. Tometaka, K. Yamane, H. Ohgaki, K. Masuda, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, **507**, pp. 340-343 (2003).
- 11) T. Kii, A. Miyasako, S. Hayashi, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, *Nucl. Instrum. & Meth.*, A528, p. 408 (2004).
- 12) T. Kii, Y. Nakai, T. Fukui, H. Zen, K. Kusukame, N. Okawachi, M. Nakano, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, Proc. 9th Intern. Conf. Synchrotron Rad. Instr. (SRI2006), Degu, Korea, AIP CONF. PROC., 879, p. 248 (2007).
- 13) K. Masuda, T. Horii, S. Amazaki, T. Kii, H. Ohgaki, T. Yamazaki and K. Yoshikawa, *Nucl. Instrum. & Methods*, A483, p. 315 (2002).
- 14) 田辺英二, 菅野浩一, Proc. 27th Linear Acc. Meeting in Jpn., 57 (2002).
- 15) 楠亀弘一, 福井敏夫, 中井陽子, 全炳俊, 紀井俊輝, 増田開, 大垣英明, 吉川潔, 山崎鉄夫, Proc. 2nd Annual Meeting of Particle Acc. Soc. Jpn. and 30th Linear Acc. Meeting in Jpn., p. 379 (2005).
- 16) K. Masuda, T. Kii, K. Kusukame, H. Ohgaki, T. Shiiyama, T. Yamazaki, K. Yoshikawa and H. Zen, Proc. 27th Free Electron Laser Conf., p. 656 (2006).
- 17) T. Shiiyama, K. Kanno, K. Masuda, H. Zen, S. Sasaki, T. Kii, H. Ohgaki and E. Tanabe, Proc. of FEL2007 pp. 398-401 (2007).
- 18) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, S. Sasaki, T. Shiiyama, H. Zen, R. Kuroda, M. Kuriki, N. Terunuma, J. Urakawa, Y. Kamiya and M. Washio, Proc. of FEL2007 pp. 390-393 (2007).
- 19) Heishun Zen, Hideaki Ohgaki, Kai Masuda, Toshiteru Kii, Kohichi Kusukame, Toshio Fukui, Yoko Nakai, Tetsuo Yamazaki and Kiyoshi Yoshikawa, AIP Proc., Synchrotron Radiation Instrumentation 2006, pp. 240-243 (2006).
- 20) T. Kii, K. Masuda, M. Nakano, H. Ohgaki, N. Okawachi, T. Yamazaki, K. Yoshikawa and H. Zen, Proc. 27th Free Electron Laser Conf., p. 653 (2006).