

# KU-FEL 計画——概要と現状——

山崎 鉄夫<sup>1</sup>, 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  
京都大学エネルギー理工学研究所  
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

## 概要

京都大学エネルギー理工学研究所においては、エネルギー科学研究のための、小型で経済的な赤外～遠赤外領域での自由電子レーザー装置を建設中である。本報告においては、全体計画の概要、計画の進捗状況に関して簡単に述べる。

## 1. はじめに

FEL の波長可変性に代表される長所は、最近では広く知られているが、装置が大型で高価になることから、利用面では意外に進んでいない。当所では、大学の研究所レベル、産業界において使用可能な小型で経済的な自由電子レーザー (free-electron laser, FEL) 装置の研究・開発を進めている。FEL は、当所におけるエネルギー科学研究等に使用される予定である。勿論、将来的には所外、学外のユーザも視野に入れている。FEL の波長範囲は赤外～遠赤外領域を目標としている。計画の概要を **図 1** に示す。S バンド 4.5 空胴高周波電子銃によって入射部の小型

化を図り、FEL 発生後の電子ビームをリニアック加速管に戻してエネルギー回収を行う。エネルギー効率を上げることが目的ではあるが、常伝導リニアックを使用するので、回収率はそれ程期待できず、むしろ放射線遮蔽の負担を軽減することに主眼を置く。偏光可変な FEL を考えているが、偏光可変アンジュレータを使用するか、外部で偏光可変にするかは未定である。また、通常大強度になるに従って FEL のバンド幅が広がるが、将来的には **図 1** に示した 2 段階の MOPA (master oscillator and power amplifier) 方式等によってバンド幅を狭めることも考えている。また、逆 Compton 散乱によって高輝度準単色 X 線を発生させることも計画しているが、この方式の短所である低収率を改善するために、FEL そのものをレーザーとして使用することを考えている。

## 1. リニアック

加速器としては、当所において開発してきた 4.5 空胴高周波電子銃と 3 m のリニアック加速管を準備している。高周波電源は、RF 電子銃と加速管とは

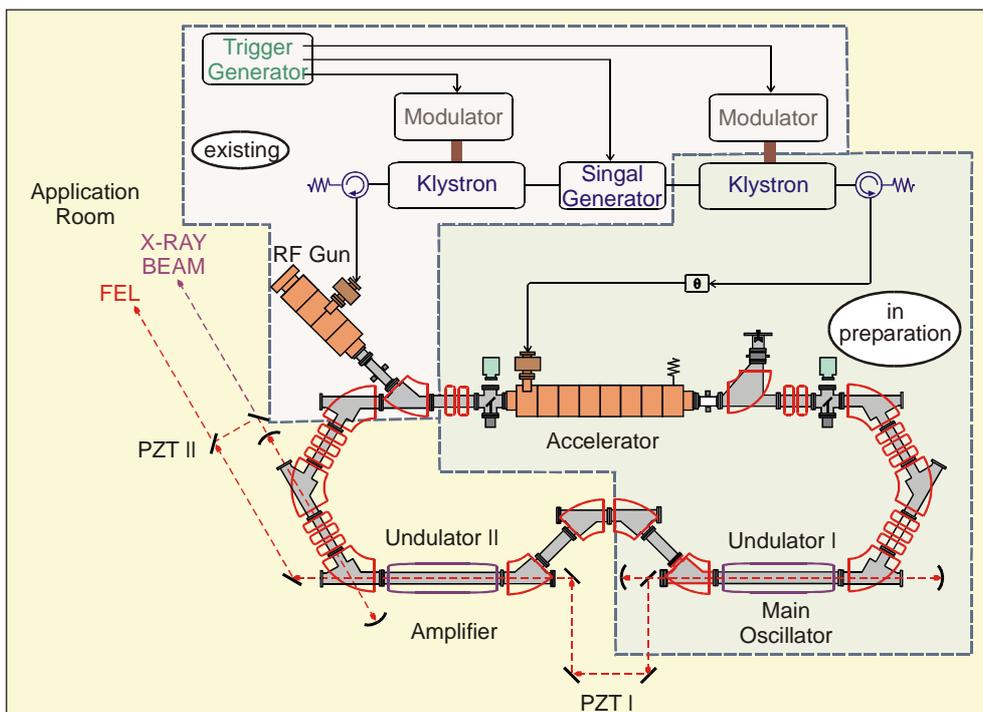


図 1 KU-FEL 計画概念図

<sup>1</sup> E-mail: yamazaki@iae.kyoto-u.ac.jp

別々のものを使用する。

## 2.1 高周波電子銃

入射器は、当所において開発してきた S バンド 4.5 空洞高周波電子銃 [1] を使用する。クライストロンは 10 MW の Thomson TV2019B6 を使用している。カソードは可能な限り現在の熱陰極型を使用したいと考えている。光陰極も考慮に入れてはいるが、レーザーが高価になり、また現状では高輝度にするほど寿命が短い。電子銃内における電子ビームの挙動は、当所において開発されたシミュレーション・コードによって計算がなされている [2]。当所では、既にこの電子銃によって 9 MeV 程度までの電子加速を行い、図 2 に示す電子ビーム診断系において、電子ビームのスペクトル、プロフィール等の測定を行っている。エミッタンスの測定は現在進行中である（本研究会 8P-25 参照）。

熱陰極型高周波電子銃の最大の短所は逆加速電子によるカソードのヒーティングであり、当所においても重大な問題となっているが、当所ではその定量的な測定を行い、解決法を模索している [3]。カソードの表面温度は、赤外線温度計によって計測され、その結果と上記シミュレーションによって、逆流電子ビームのパワーを定量的に算出することに成功し、当然ではあるが、逆流電子による影響が深刻であることが判明している。また、逆流電子の抑制法を試験しているが、これらの研究の最近の進展に関しては、本研究会の 7P-16 を参照されたい。

高周波電子銃からリニアック加速管までのアクロマティックなビーム輸送系の、電磁石等の部品は準備完了しているが、現在はまだ加速管まで接続しておらず、図 2 の配置によって実験を行っている。エネルギー・スペクトルは、偏向電磁石と輸送系に置かれたスリットによって測定しているが、加速管に入

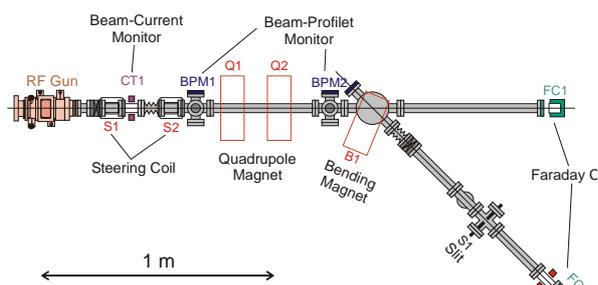


図 2 高周波電子銃ビーム診断系

る電子ビームのエネルギー選別も、このスリットによって行われる。4.5 空洞高周波電子銃での加速の結果、電子ビームエネルギーが数 MeV になり、α電磁石を使用すると大きくなり過ぎるのでこの方式を選んだ。

## 2.1 リニアック加速管

リニアック加速管、高周波源、電子ビームの主要パラメータを表 1 に示す。加速管は電総研から、クライストロンは高エネルギー加速器研究機構から借

用したものである。クライストロン電源は、高周波電子銃用、加速管用共に日新電機社製のもので、比較的小型で、かつ PFN 出力波形はモータ駆動によって遠隔調整が可能で、従って電子ビーム波形を観測しながら波形を調整することが可能である。表 1 にある電子ビームのパラメータは予測値であり、確認したものではない。

表 1 加速管、電子ビームのパラメータ

加速管	
周波数	2856 MHz
構造	定勾配
モード	$2/3 \pi$
有効長	2.9 m
ディスク内径	25.00 ~ 21.84 mm $\phi$
高周波源	
クライストロン	三菱 PV-3030
ピーク出力	20 MW
マクロパルス幅	< 10 $\mu$ sec
パルス繰返し	$\leq 10$ pps
クライストロン電源	
パルス幅	< 10 $\mu$ sec
リップル	< 0.3 % p-p
電子ビーム	
エネルギー	20 ~ 40 MeV
ビームサイズ	1 $\times$ 1 mm FWHM
マイクロバンチ長	< 10 psec
エネルギー幅	~ 1.5 %

本計画において FEL に使用される電子エネルギーは、2 段階方式による大出力化や FEL 逆コンプトン散乱を考慮しても、高々 2% である。従って、将来は使用済みの電子を加速管の減速位相に再入射してエネルギー回収することを計画している。S バンド常伝導リニアックにおけるエネルギー回収の研究に関しては、7P-26 を参照されたい。常伝導リニアックにおいては、加速管壁における高周波の熱損失が大きく、もとより高い回収率は期待できないが、低エネルギーになったビームをビームダンプに入れるので、放射線遮蔽の負担は大幅に軽減できるものと期待している。さらに遠い将来計画としては、超伝導リニア

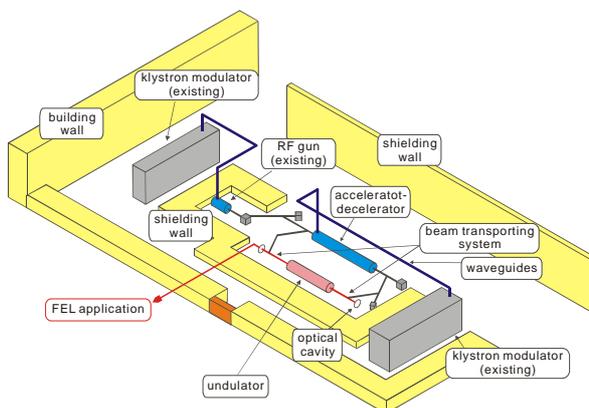


図 3 KU-FEL 配置図（近未来）

ックを使用することも視野に入れている。

リニアック通過後の電子ビームは、当面の計画を示す図3に見られるように、60°偏向磁石と四重極電磁石によるアクロマティックな輸送系を通してアンジュレータに入射される。この図では、エネルギー回収の基礎実験までは考慮されているが、FEL 逆コンプトン散乱に関しては描かれていない。

### 3. 自由電子レーザー

#### 3.1 アンジュレータ

本計画では、偏光可変 FEL を目標にしている。アンジュレータ自体を偏光可変型とする場合、小貫型と APPLE-II 型が候補として挙げられ、短周期にする場合は後者がやや有利と考えられるが、いずれにせよ相当の困難が予想される。その場合は、外部において何らかの方法で偏向を変えることが考えられるが、FEL 強度の問題と共に、赤外～遠赤外領域で適切な素子があるかどうかは鍵である。この場合、当所において研究を行っている staggered array 型アンジュレータ [4] の使用も考えられる。

当所では、当面は旧自由電子レーザー研究所(FELI, 現大阪大学工学研究科自由電子レーザー研究施設 iFEL) と東大のグループの東大原子力施設のリニアックにおける発振実験の折に使用したアンジュレータを使用する予定である。このアンジュレータは Nd-Fe 系のもので、横型であるが、構造に関しては、文献 [5] を参照されたい。周期長 40 mm, 周期数 40 である。ただし、これはギャップ間隔が固定のものであったので、当所において可変になるように改造した。ギャップ間隔が改造前の 26 mm の場合の FEL 波長と理想的ゲインを図 4 に示す。ゲインに関しては、単なる 1 次元計算の結果であり、重畳因子、電子ビームパラメータ等はまったく考慮されていない。当所では、計画に沿った FEL のシミュレーションを開始しているので、詳細は 8P-6 を参照されたい。

前述のように、偏光可変 FEL に関しては、次のステップで考慮する。

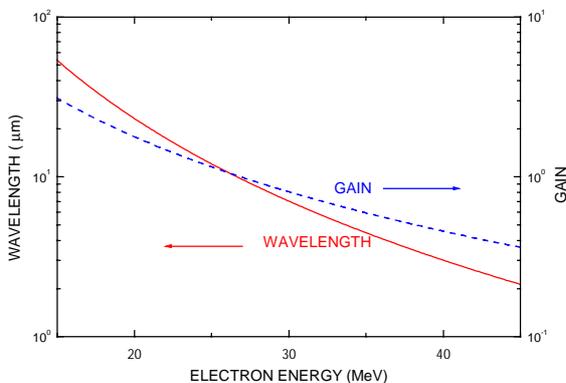


図4 KII-FELI における FELI 波長と理想的ゲイン

#### 3.2 光学系

光共振器、光測定系に関しては、あまり設計が進んでいない。光共振器長に関しては、上記 FELI と東大のグループの実験 [5] 同様 3.78 m を予定している。ミラーの曲率、出力結合等の詳細は、上記 FEL シミュレーションによって決定する予定である。アンジュレータ放射、FEL の出力、スペクトルの測定系に関しても、未定である。

### 4. おわりに

以上、KU-FEL 計画の概要と現状に関して簡単に述べた。現在文部科学省への使用施設変更申請を進めているところであり、許可が降り次第設置を開始する予定である。

最初に述べたように、FEL の利用に関しては、当面当所内のグループとの協力によって進めることを考えている。当所では、炭酸ガス等の環境有害物質を光触媒反応によって有用物質に変換する研究、生体研究、核融合炉材料の研究等を行っているグループがあり、FEL の高選択性を利用して、それらの研究において協力できるものと期待している。研究所内外の利用者も歓迎する。

### 謝辞

本計画においては、京都大学化学研究所の野田章氏、岩下芳久氏、白井敏之氏、京都大学工学研究科量子理工学研究実験センターの吉田紘二氏、産業技術総合研究所の三角智久氏、大阪大学工学研究科の粟津邦夫氏、経済産業省資源エネルギー庁の西村栄一氏、日新電機(株)の大下英次氏、当研究所の西之園善之氏をはじめとする多くの方々の御協力をいただいている。

### 参考文献

- [1] Y. Yamamoto, T. Inamasu, K. Masuda, M. Sobajima, M. Ohnishi, K. Yoshikawa, H. Toku and E. Tanabe: Nucl. Instr. & Meth., **A393**, 443-446 (1997).
- [2] K. Masuda, K. Yoshikawa, M. Ohnishi, Y. Yamamoto, H. Toku, M. Sobajima and J. Kitagaki: IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech., **46**, No. 8, 1180-1182 (1998).
- [3] T. Kii, T. Yamaguchi, R. Ikeda, Z. Dong, K. Masuda, H. Toku, K. Yoshikawa, and T. Yamazaki: Nucl. Instr. & Meth., **A475** (2001) 588.
- [4] K. Masuda, J. Kitagaki, Z. Dong, T. Kii, T. Yamazaki, and K. Yoshikawa: Nucl. Instr. & Meth., **A475** (2001) 608; J. Kitagaki, K. Masuda, Z. Dong, T. Kii, T. Yamazaki, and K. Yoshikawa: *ibid.*, 613.
- [5] E. Nishimura, K. Saeki, S. Abe, A. Kobayashi, Y. Morii, T. Keishi, T. Tomimasu, R. Hajima, T. Hara, H. Ohashi, M. Akiyama, S. Kondo, Y. Yoshida, T. Ueda, T. Kobayashi, M. Uesaka, and K. Miya: Nucl. Instr. & Meth., **A341** (1994) 39.