

小規模加速器施設は持続可能か：京都大学エネルギー理工学研究所の例

HOW CAN A SMALL-SCALE ACCELERATOR FACILITY SURVIVE? CASE STUDY OF THE INSTITUTE OF ADVANCED ENERGY, KYOTO UNIVERSITY

大垣 英明^{#, A)}, 紀井 俊輝^{A)}, 全 炳俊^{B)}
Hideaki Ohgaki^{#, A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Heishun Zen^{B)}
^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Abstract

A brief introduction of the Mid-Infrared Free Electron Laser Facility (KU-FEL) of the Institute of Advanced Energy, Kyoto University will be reported. In addition, the current problem about the maintenance and development of the KU-FEL will be discussed in this report. KU-FEL, one of small-scale accelerator facility, can be secured some degree of sustainability, even if it is not perfect, by obtaining the scale merit and by external support such as PASJ.

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、KU-FEL と呼ばれる小型の加速器施設を建設・維持してきている。時系列的には、1995 年より自由電子レーザー研究を、吉川潔研究室にて開始し、1998 年より山崎鉄夫研究室が発足し、共同で 40 MeV リニアックの建設と中赤外域自由電子レーザーの発振に至った[1]。現在では KU-FEL は、附属エネルギー複合機構研究センターの基幹装置、更に全国共同利用・共同研究拠点活動[2]の装置として、電子ビーム及び FEL のユーザーへの提供を行っている。また、最近では小型 THz 放射装置 (THz-CUR) の開発も行っている。Figure 1 に KU-FEL 施設の鳥観図を示す。

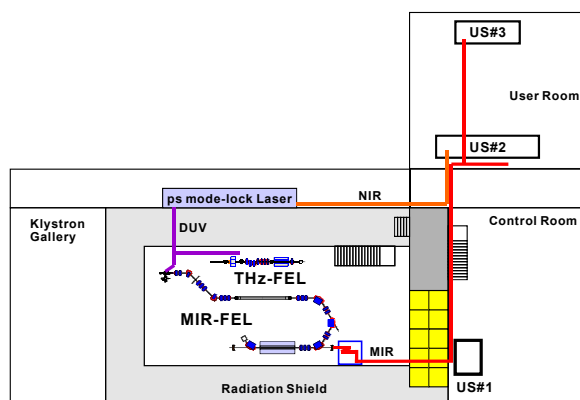


Figure 1: KU-FEL facility.

これらの活動は、主にエネルギー理工学研究所の比較的小規模の予算を、毎年積み上げて行われてきた。これに、KEK の大学支援事業、並びに産総研や旧 FEL 研、量子科学技術研究開発機構等で不要になったコンポーネントを集めて、ハードウェアの整備を行ってきており、リニアック建設に 4 年、加速器室整備と移設に約 2 年、当初の目標の FEL 発振までには更に約 4 年の歳月を要している。FEL 発振後は、ユーザー利用に徐々に移行しつつ、FEL の安定化、高出力化、広帯域化を行ってき

ている。

本稿では、これまでの加速器建設及び FEL 開発、更にこれらを維持・発展していくための方策や問題点等について報告する。

2. KU-FEL 開発と高度化

KU-FEL における加速器・FEL 研究では、当初は 4.5 セル熱陰極型高周波電子銃の性能向上が主な研究項目 [1]であった。これに関しては加速器学会誌 (vol.11) に既に報告しているので、ご参照頂ければ幸いである。なお、KU-FEL に関しては電子リニアックの建設と、FEL 発振に関わるハードウェア建設の 2 フェーズに分けられ、主に予算上の面にて、それぞれにかなりの時間 (約 4+2+4 年) を要した事は、本稿の主題である、KU-FEL のような加速器施設の持続可能性にも関係するので、ここに再度記しておく。

FEL 発振後は、徐々に FEL 利用研究のための R&D に移行してきた。これには上述のように、量研機構より、ERL-FEL にて使用されていた 1.8 m アンジュレータを、2011 年に譲り受けた事は特記すべき事である。これにより、FEL ゲインの向上が可能となるばかりでなく、アンジュレータ交換といふかなり大規模な装置の更新を契機に、熱陰極 RF 電子銃の光陰極モード、あるいは光陰極 RF 電子銃の導入も考慮に入れて、FEL 光共振器の再設計とアンジュレータダクトの変更を行った。これにより FEL 光の格段の高性能化が行われた [3]。

一方、2013 年には、KEK の加速器支援事業 (2008-2009 年度) にて、リニアックにビーム位置モニタを導入し、これを用いた位置・エネルギー・加速管位相のフィードバック制御を導入し、加速器の安定性を向上させてきている [4]。

これらの装置開発の結果、現在、波長 3.4-26 μm において連続的に発振可能となっている。詳細は本会にて行われる報告を参照頂きたい [5]。同報告より Table 1 に KU-FEL の主要パラメータを掲載する。

KU-FEL 施設では、中赤外領域の FEL 光に加え、THz 領域の光源の開発も進めており、現在、光陰極 RF 電子銃ベースの THz-CUR に取り組んでいる [6]。THz-THz 装置に関しても、KEK の大学支援事業 (2005-2007

Table 1: Main Parameter of KU-FEL[5]

Wavelength Range	3.4 – 26 μm
Max. Macro-pulse Energy	41.8 mJ @4.9 μm
Typ. Macro-pulse Duration	2 μs
Max. Micro-pulse Energy	7.3 μJ @4.9 μm
Micro-pulse Duration	0.6 ps @12 μm
Typ. Bandwidth	3%-FWHM
Max. Extraction Efficiency	5% @11.6 μm

年度)による、一連の光陰極 RF 電子銃の開発に関連し、1 台の試作機を作成できた事に端を発している[6]。また、現在使用している THz アンジュレータは、産総研より譲り受けたものである。

現在、中赤外 FEL に関しては、2018 年度より光・量子飛躍フラグシッププログラム(Q-LEAP) [7]に参画し、中赤外自由電子レーザー(FEL)で駆動する高繰返し高次高調波発生(HHG)アト秒光源(FEL-HHG)の実現を目指し、高強度数サイクル中赤外 FEL の発生に関する研究を開始している。

一方、KU-FEL 施設とは研究面では完全に異なる課題ではあるが、レーザーコンプトン散乱ガンマ線の開発・利用に関する研究も並行して行っており、2010 年度より 5 年間、量研機構(当時原子力研究開発機構)や産総研等と研究開発チームを形成し、ガンマ線と中性子のハイブリッド型核物質検知装置の開発を海上コンテナ向けに行った[8]。本事業では、本研究グループは量研機構関西研の加速器施設や米国 Duke 大学の HI γ S 施設の利用者として事業を進めた。この経験は KU-FEL 施設の共同利用等へ繋がっている。

3. 施設維持と問題点

これまで述べてきたように、本報告は KU-FEL 施設での研究面の成果を述べるより、施設維持の面をテーマにしており、これまでのハードウェア整備については、上述したように、研究所内部資金を始め、KEK 大学支援や使用済みのコンポーネントの借用、移譲にて行われてきた。以下に主要な資金源等を記す。

1. 研究所内部資金「附属エネルギー複合機構研究センター先行投資」:クライストロンモジュレーター(2 台)
2. 京都大学施設整備費:FEL 加速器室の整備
3. KEK 大学支援事業:光陰極 RF 電子銃、ビームポジションモニター
4. 文科省概算特別研究経費「光エネルギー材料連携研究設備」:光陰極励起用レーザー
5. 量研機構:1.8m アンジュレータ
6. 産総研:3m 加速管、THz 用アンジュレータ、電磁石類、イオンポンプ等
7. 大阪大学(旧 FEL 研):光共振器、1.6m アンジュレータ

このように、KU-FEL 施設は公認プロジェクトとして発足したものではなく、研究室ベースの趣味の装置群と言っても過言ではない。

一方、維持経費の財源としては

1. 研究所内部資金「附属エネルギー複合機構研究センター基幹装置維持費」

2. 文科省「先端研究施設共用促進事業:ADMIRE 事業(2012-2015)」[9]

3. 文科省特別研究経費「革新的高効率太陽光利用技術の開発(2012-2018)」

4. 科研費等外部資金の間接経費
となっている。なお、2. の ADMIRE 事業により課金制度(有償化)を本施設では導入するとともに、1 年間のみではあるが、技術支援員の雇用が可能であった。しかしながら、財源の削減とともに、本雇用も継続できず、歴史的に KU-FEL では技術支援員は研究所からの支援も無い状況が続いている。

一方、第 6 期科学技術基本計画を見据えた課題・検討事項(たたき台)[10]では、先端研究施設・設備・機器の整備・共用として

<国としての戦略的な整備>共用プラットフォーム(数億~数十億円規模の最先端研究施設・設備)

と
<各機関の組織としての整備>新共用(数百万~数億円規模の研究設備・機器)

に分けて記述されており、後者では「ラボから組織へ」として機器・人材・資金・情報の集約があげられている。また、大学・法人間での広域的な連携の促進も指摘されており、施設の共用化、集約・連携が今後加速していく可能性が高い。特に加速器施設のような、他の汎用機器とは性質の異なる施設は、この路線に乗りやすいと考えられており、モデルケースとして大型施設も巻き込んだ標的にされ易い。本施設でも加わった、「先端研究施設共用促進事業」には多くの放射光施設が参画し、「先端研究基盤共用促進事業」にて「光ビームプラットフォーム」事業が進められている。

KU-FEL 施設では、上述のようにエネルギー理工学研究所が「先端研究施設共用促進事業」で行った ADMIRE 事業に参画し、有償利用化を行ってきている。残念ながら「先端研究基盤共用促進事業」への乗り継ぎは果たせずに終わっているが、現在、研究所が属する京大宇治キャンパスの4研究所による、「宇治地区設備サポート拠点」事業の提案を京都大学本部に対して行っている。しかしながら、この大学事業は、これまでの装置維持費を共用拠点化予算に移し、保守の効率化と有償利用化を進めて、経費の削減を目指し最終的には施設(拠点)の自立化を目指すものである。

なお、有償化による本施設の現在の収入は 200 万円弱/年であり、必要最小限の維持費の半分にも満たない。よって実際の維持費に関しては、結局手当たり次第に申請書を書いて、何らかの形で資金をかき集めるしか解は無いの現状である。しかし、これでは高額補修費が出せず、更には積み立てが不可能な会計システムであるために、クライストロンのような巨額のコンポーネントが故障した場合は、全く手の打ちようが無く、そのままでは店仕舞いに陥る事になる。恐らく、研究所に泣きついて分割返済というのが普通考えられる解決法であろうが、これを持続可能な運営という訳にはいかない。よって、本報告の表題にある持続可能性か?との問いかけに関しては、ネガティブな回答にはならざるを得ない。しかしながら、小規模施設であるが故に、研究所・大学内に大きな迷惑をかけない限りは、積極的に廃止される恐れも少ないと

考える。また、学会を始め、外部からの精神的にせよ何らかの支援が得られる努力を続けることで、ある程度の発展性も含め、持続性は保たれると期待している。

4. まとめ

京都大学エネルギー理工学研究所の中赤外自由電子レーザー施設(KU-FEL)の建設と維持・開発について、これまでの経緯と現在の問題点を報告した。表題にあるように KU-FEL のような、小規模かつ出自の曖昧な加速器施設は、その維持発展に問題が多々あるものの、その小規模ならではの特色と、学会を始めとする外部の何らかの支援を得ることで、完全とは言えないまでも、ある程度の持続性は確保できるものと期待している。

参考文献

- [1] 大垣英明、紀井俊輝、増田開、全炳俊、吉田恭平、“京都大学中赤外自由電子レーザー装置の現状と利用”「加速器」Vol. 11, No. 4, 2014(214-220).
- [2] http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission/
- [3] K. Ishida, M.A. Bakr, Y-W. Choi, R. Kinjo, M. Omer, K. Yoshida, N. Kimura, T. Komai, M. Shibata, K. Shimahashi, H. Imon, H. Zen, T. Sonobe, K. Masuda, T. Kii, H. Ohgaki, “EVALUATION OF LASING RANGE WITH A 1.8 m UNDULATOR IN KU-FEL”, Proc. of the 8th Annual Meeting of PASJ (August 1-3, 2011), p.1039-1042.
- [4] H. Zen, K. Okumura, K. Takami, Y. Tsugamura, M. Inukai, K. Mishima, H. Negm, K. Torgasin, K. Yoshida T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, “STABILIZATION OF MID-INFRA RED FEL BY FEEDBACK CONTROLS”, Proceedings of IPAC2014, 1745-1747(2014).
- [5] H. Zen, S. Krainara, T. Kii, H. Ohgaki, “PRESENT STATUS OF FREE ELECTRON LASER FACILITY AT KYOTO UNIVERSITY”, Proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, (2019).
- [6] N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kamiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakaue, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki, J. Yang, “Improvement of an S-band RF gun with a Cs₂Te photocathode for the KEK-ATF”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A613 (2010) pp.1-8.
- [7] R. Hajima *et al.*, “自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒 X 線光源”, Proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ, (2019).
- [8] H. Ohgaki, I. Daito, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, T. Misawa, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Kando, and S. Fujimoto, “Nondestructive Inspection System for Special Nuclear Material Using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma-rays”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume: 64, No.7, July (2017), 1635-1640.
DOI 10.1109/TNS.2017.2652619
- [9] <http://admire.iae.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- [10] 研究基盤整備・高度化委員会(第7回)資料 H31.2.4.