

話 題

京都大学中赤外自由電子レーザー装置の現状と利用

大垣 英明*・紀井 俊輝*・増田 開*・全 炳俊*・吉田 恭平*

Present Status and Application of KU-FEL

Hideaki OHGAKI*, Toshiteru KII*, Kai MASUDA*, Heishun ZEN* and Kyohei YOSHIDA*

Abstract

We have been developing MIR-FEL driven by an electron linac in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. The linac, which consists of a thermionic RF-gun, an s-band accelerator, a bunch compressor, and an undulator, accelerates electron beam up to 40 MeV with micropulse duration of less than 1 ps. The FEL wavelength covers from 5 to 20 μm with several mJ/macropulse has been delivered for users. As an example of the user application, selective phonon excitation in SiC is introduced in this paper. We have been developed a new concept short period undulator. The report on this study will be presented in this paper as well.

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¹⁾、またFEL発振に関して報告している²⁾が、その後、アンジュレータの交換や、電子ビームの安定化により発振波長域の拡大や安定したFELの利用者への提供が可能になっている。そこで、本稿ではKU-FELの現状と概要及び利用研究の一例、更には当グループで進めているバルク超伝導体を用いたアンジュレータについて報告を行う。

2. KU-FEL

京都大学小型中赤外自由電子レーザー (Kyoto University Free Electron Laser : KU-FEL) は電子源として熱陰極高周波電子銃を採用した小型電子線形加速器を用いた中赤外自由電子レーザーである。京都大学エネルギー理工学研究所では、1995年より熱陰極高周波電子銃の基礎研究を開始し、熱陰極高周波電子銃で大きな問題となっていた逆流電子による陰極加熱により引き起こされ

る諸問題（総称して Back-bombardment Effect と呼ぶ）を補償する手法を積極的に導入することにより、2008年にレーザー発振を達成した³⁾。その後、2009年よりユーザーへの中赤外レーザー光の供給を開始した。図1に2009年以降の加速器総運転時間とユーザー利用時間の推移を示す。年々、ユーザー利用時間が増加しており、2013年度には693時間の総運転時間の内、499時間(約72%)がユーザー利用に供されている。ユーザー利用は学内ユーザーが主であるが、京都大学エネルギー理工学研究所は2011年度に文部科学省の

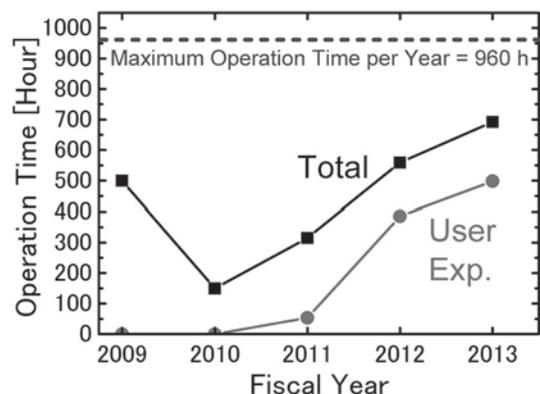


図1 2009年以降の加速器総運転時間とユーザー利用時間の推移

* 京都大学エネルギー理工学研究所 Institute of Advanced Energy, Kyoto University
(E-mail: ohgaki.hideaki.2w@kyoto-u.ac.jp)

「共同利用・共同研究拠点：ゼロエミッションエネルギー研究拠点」(http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission/index.html)として認定され、この拠点活動の一部として、外部ユーザーの利用を受け入れている。また、昨年度より文部科学省先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業「イオン加速器とマルチスケール材料評価装置群による産業支援」(<http://admire.iae.kyoto-u.ac.jp/facilities.html>)への装置提供を開始し、産業利用への装置供用を開始した。

2.1 システム構成

KU-FELは、最大エネルギー 40 MeV の線形加速器とアンジュレータ、光共振器で構成される。施設のレイアウトを図2に示す。線形加速器は熱陰極高周波電子銃・進行波型加速管・磁気バンチ圧縮セクションからなる。高エネルギー（～9 MeV）かつ短パルス電子ビームを 30 cm という非常に小型でシンプルな構成により実現可能であることから、熱陰極高周波電子銃を電子源として採用することで加速器全体を 6 × 15 m の本体室に収納可能となっている。現在の線形加速器・アンジュレータ・光共振器の主要パラメータを表1に示す。

光共振器は一对の金コート銅基板ミラーで構成されており、上流側ミラーの中心には直径 1 mm の光取り出し孔があげられている。この孔から取り出されたレーザー光は球面ミラーにより平行ビーム化され、制御室および応用実験室にある合計3つのユーザーステーションに伝送される。それぞれの名前と主な用途を下記に列挙する。箇条書きの番号はそれぞれ、図2の(1)～(3)に対応

している。

- (1) FEL ビーム診断・簡易照射ステーション
中赤外モノクロメータが設置されており、FEL ビームの波長分布測定がここで行われる。また、集光光学系を配置することで、簡易な照射実験を行うことが可能。
- (2) 固体の蛍光・ラマン分光ステーション
He-Cd レーザー、ダイオードレーザー、Nd-YAG レーザー、紫外-近赤外分光器が蛍光分光やラマン分光の為に使用可能。14 K まで冷却可能なクロズドサイクルヘリウム冷却クライオスタットが設置されており、サンプルを極低温まで冷却可能。
- (3) 多目的ユーザー利用ステーション
光学台が1台設置されており、ユーザーが自分の装置を持ち込み実験可能。

表1 KU-FEL 構成要素の主要パラメータ

熱陰極高周波電子銃	
共振周波数	～ 2856 MHz
空洞数	4.5
加速モード	π mode
Q 値	12500
結合定数	2.8
R/Q	980 Ω
陰極材料	LaB ₆
陰極半径	1 mm

進行波加速管	
共振周波数	2856 MHz
構造	定勾配型
加速モード	2/3 π mode
有効長	2.9 m

アンジュレータ	
磁気回路構成	Hybrid
周期長	33 mm
周期数	52
最大 K 値	1.35
最短ギャップ	16.5 mm

光共振器	
曲率半径	2.984 m (上流側) 2.503 m (下流側)
光出力孔直径	1 mm (上流のみ)
光共振器長	5.0385 m
ミラー反射率	99.04%

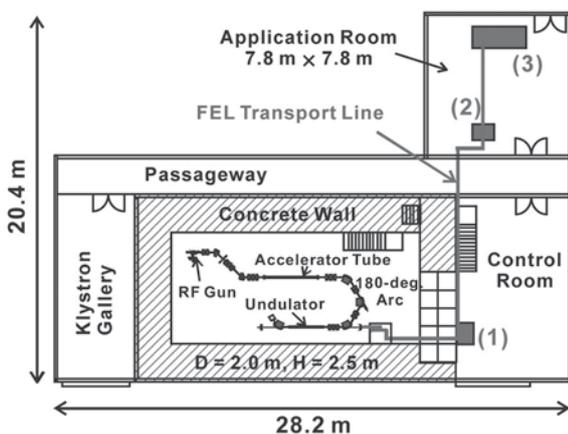


図2 KU-FEL 施設のレイアウト

2.2 電子ビーム特性

KU-FELは電子銃として熱陰極高周波電子銃を採用している。熱陰極高周波電子銃は、高周波加速空洞に直接、熱陰極を装填したものであり、高エネルギーかつバンチ化された電子ビームを非常に小型でシンプルな構成により実現可能である。しかし、このタイプの電子銃には、Back-bombardment現象という非常に深刻な問題⁴⁾がある。Back-bombardment現象とは、熱陰極から高周波電場により引き出された電子の一部が、次の空洞に進む前に電場方向が逆転し、陰極に逆加速され、陰極に衝突することにより生じる一連の現象のことを指す。陰極に逆加速された電子が衝突すると、電子の運動エネルギーが陰極中で熱エネルギーに変換され、陰極温度が上昇する。陰極温度が上昇すると熱陰極から放出される電流が増加する。熱陰極から供給される電流が増加すると、逆流して陰極に衝突する電子数も増加し、熱陰極の温度・ビーム電流がマクロパルス中で加速度的に増加する。ビーム電流、即ちビーム負荷が増加すると、共振空洞内に蓄積された高周波電力が減少し、空洞電圧が低下するため、マクロパルス中で電子ビームのエネルギーが低下する。このため、長マクロパルス運転を必要とする共振器型FEL駆動用Linacの電子源として使用する際には、大きな困難が伴う。我々の研究グループではBack-bombardment現象を解決するために様々な手法を導入してきた⁵⁻⁸⁾。紙面の都合上、それぞれの詳細な説明は割愛させて頂くが、現在、FEL発振を達成する為に実際に使用している手法を下記に列挙する。興味のある方はそれぞれ、参考文献をご参照頂きたい。

(1) Sweep Magnet 法

陰極近傍に横方向磁場を印加し、逆流電子を陰極から逸らせる⁵⁾。

(2) RF 振幅変調法

陰極加熱に伴う電流増加に応じて、電子銃に投入するマイクロ波電力を増加させ、電子ビームエネルギー低下を補償する⁶⁾。電子銃に加えて、進行波加速管にも導入⁷⁾。

(3) Cavity Detuning 法

空洞に投入するマイクロ波の周波数よりも空洞の共振周波数を低く設定することで、ビーム負荷変動による電子ビームエネ

ルギー変動幅を小さく抑える⁸⁾。

これらの手法を積極的に導入することにより、**図3**に示すように、電子ビーム電流がマクロパルス中で2倍以上増加する条件において、電子ビームエネルギーを一定に保ち、中赤外自由電子レーザー発振に使用可能な電子ビームの供給に成功している。アンジュレータ部での主な電子ビームパラメータを表2に示す。

2.3 FEL ビーム特性

KU-FELは現在、5～20 μm の波長領域にて発振が可能であり、分子の指紋領域をほぼカバーしている。KU-FELはマクロパルスとマイクロパルスという常伝導線形加速器で一般的に得られる2つの時間構造を有している。FELビームのマクロパルスは数千のマイクロパルスにより構成され、典型的なマクロパルス幅は1～2 μs -FWHMである。マイクロパルス幅は約0.6 ps-FWHMであり、この値は波長12 μm での実測値である⁹⁾。マイクロパルス間隔は350 psであり、即ち、2 μs のマクロパルス中に約5700個のマイクロパルスが含まれる計算となる。

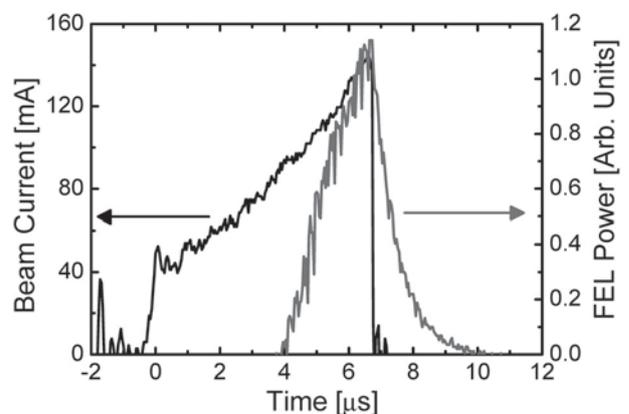


図3 マクロパルス中でのアンジュレータに入射される電子ビーム電流とFELパワーの時間発展

表2 アンジュレータ部での主な電子ビームパラメータ

平均電流	～110 mA
マクロパルス幅	6.8 μs
エネルギー幅	～1%
規格化 エミッタンス	4 π mm mrad (horizontal) 12 π mm mrad (vertical)
バンチ長	< 2 ps-RMS (measured) ～0.5 ps-RMS (estimated)

FEL ビームのスペクトル幅は光共振器長の調整条件にも依るが、大きくて 3%-FWHM 程度である。また、実測された波長安定度は約 1.3%-RMS 程度である⁹⁾。現在、発生可能なマクロパルス当たりの光エネルギーと各波長での光スペクトルを図 4 (a) と (b) に示す。

3. FEL 利用研究例：選択的格子振動励起

3.1 研究背景

固体の格子振動と電子の相互作用で起こる電子移動過程メカニズムを解明することによって、より高性能な固体デバイス開発が可能と考えられる。そのための基礎的な研究として、格子振動の吸収エネルギーに対応する光（中赤外レーザー）を固体に照射して特定の格子振動を選択的に励起する試みを行っている。具体的には、格子振動の状態を直接的に観測可能なアンチストークスラマン散乱分光法を用いて、KU-FEL（以下 FEL と略す）による選択的格子振動励起の直接的証明を行った。アンチストークスラマン散乱は、振動励

起状態にある電子と光子が相互作用することによって発生する現象である¹⁰⁾。したがって、極低温状態では、電子の振動励起状態への遷移確率が低いため、アンチストークスラマン散乱光の発生確率が極度に低く、その光は観測できない。これは言い換えれば、極低温状態でアンチストークスラマン散乱光が観測できたことは、電子が振動励起状態に励起させられたということを示している。したがって、極低温状態下での FEL 照射時に、アンチストークスラマン散乱スペクトル中にその FEL のエネルギーに相当するピークのみが観測されたことは、FEL によって格子振動が選択的に励起させられたということを示す直接的証明となる。

3.2 実験装置

図 5 に実験系を示す。プローブ光として Nd-YAG レーザーの二次高調波（波長：532 nm，パルス幅：4 ns，パルスエネルギー 3 mJ）を用いた。Nd-YAG レーザーと FEL は、トリガーにより同期させた。Nd-YAG レーザーのフルエンスは、 130 MWcm^{-2} で、偏光は水平偏光であった。また、Nd-YAG レーザーから発生する基本波（1064 nm）の成分を除去するために、カットオフ波長が 800 nm のショートパスフィルター（SP）を挿入し、石英レンズで集光した後サンプルに照射した。

FEL は、混入している高調波成分を除去するために、カットオフ波長が $4.5 \mu\text{m}$ のロングパスフィルター（LP）を挿入したのち、ZnSe レンズにより集光してサンプルに照射した。

Nd-YAG レーザーと FEL の同時照射によってサンプルから発生した光は、石英レンズでコリ

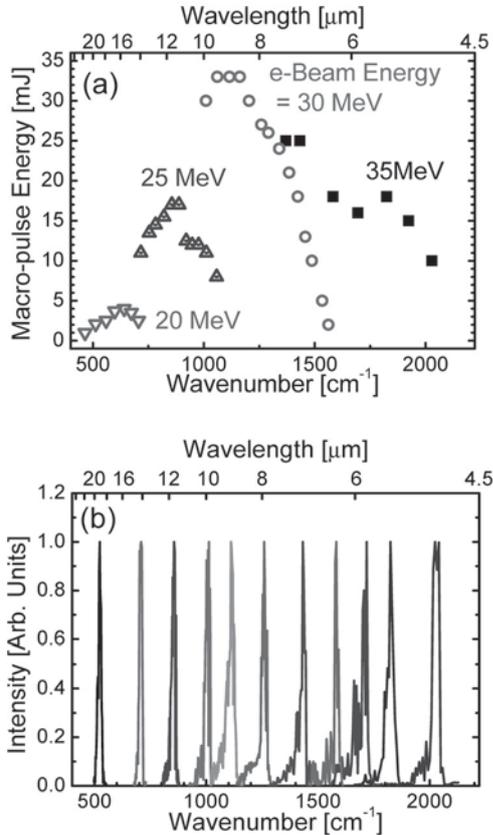


図 4 (a) 発生可能なマクロパルス当たりの光エネルギー、(b) 各波長での光スペクトル

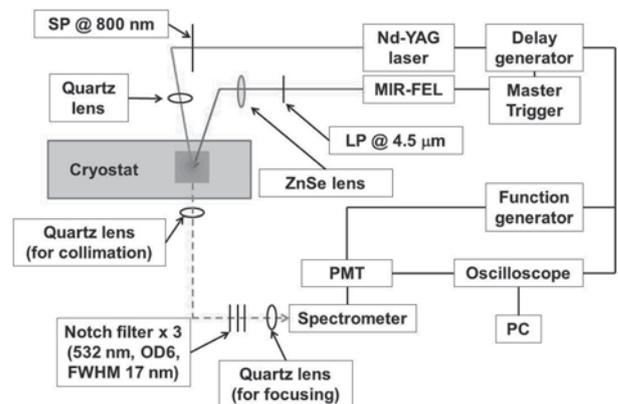


図 5 実験装置概要

メートした後に、ノッチフィルターを用いてレイリー散乱光 (532 nm) を除去し、再び石英レンズを用いて集光して分光器に導入した。そして、分光器および光電子増倍管 (PMT) を用いて光子計数法で 100 ショットを平均したシグナルを観測し、スペクトルを測定した。光電子増倍管の検出のタイミングは、KU-FEL に用いられているトリガーで同期させた。また、サンプルは、熱的な格子振動励起を抑制するために、クライオスタット内に設置した。

サンプルは、一般に市販されている単結晶炭化ケイ素 ((0001) 面, 1.5 mm × 1.5 mm × 0.33 mm, 6H-semi-insulator type SiC, Xlamen Powerway Advanced Material Co. LTD: SiC) を用いた。また、表 3 にサンプルとした SiC の格子振動について示す¹¹⁾。10.4 μm に対応する格子振動は、FLO (0) と呼ばれる格子振動で、赤外線を吸収し (赤外活性), ラマン散乱現象を示す (ラマン活性)。よって、FLO (0) は、極低温状態で 10.4 μm の波長の FEL を吸収して選択的に格子振動が励起されたときにアンチストークスラマン散乱現象が観測されると考えられる。したがって、本研究では、FLO (0) の選択的励起を狙った。

FEL の波長とパルスエネルギーは、選択的励起を狙う格子振動の吸収波長の 10.4 μm (5 mJ) と他の格子振動に対応する 12.5 μm (1.5 mJ), 格子振動のエネルギーに対応しない波長 9.05 μm (5 mJ) に調整された。MIR-FEL のフルエンスは、10.4 μm , 9.05 μm のときが、1.67 MWcm^{-2} , 12.5 μm のときが 0.5 MWcm^{-2} であった。

3.3 結果

図 6 に結果を示す。まず、熱的格子振動励起時のアンチストークスラマン散乱スペクトル測定を行うため、サンプルの温度を室温として、FEL 未照射の条件でスペクトル (図 6 (a)) を観測した。

表 3 サンプル (6H-SiC (0001)) の格子振動¹¹⁾

格子振動のエネルギー μm (cm^{-1})	赤外活性	ラマン活性	格子振動の名称
10.4 (965)	○	○	FLO (0)
12.5 (797)	○	×	FTO (0)
12.7 (789)	×	○	FTO (2/6)
13.0 (767)	×	○	FTO (6/6)

その結果、970 cm^{-1} と 800 cm^{-1} にピークが観測された。前者は、FLO (0) の格子振動で、後者はピーク幅が広いことから FTO (2/6) と FTO (6/6) に対応するピークが重なったものであると考えられる。次に、サンプルを 14 K に冷却し、FEL の照射条件を変化させたときの結果を図 6 (b) に示す。サンプルの温度が 14 K で FEL 未照射の条件 (Background) のときは、室温で観測されていた二つのピークが消失した。さらに、10.4 μm の FEL 照射により、同じエネルギーの波数 (970 cm^{-1}) にピーク (ピーク A) が観測された。

また、12.5 μm の FEL 照射時は、ピークが観測されなかった。FEL のスペクトル幅 (FWHM) が 3% であることから、12.5 μm の MIR-FEL に、12.7 μm の格子振動のエネルギーに対応する光子が含まれている。ここで、12.5 μm の FEL を照射したときに 12.7 μm のエネルギーに対応する赤外不活性な格子振動 (FTO (2/6)) のピークが

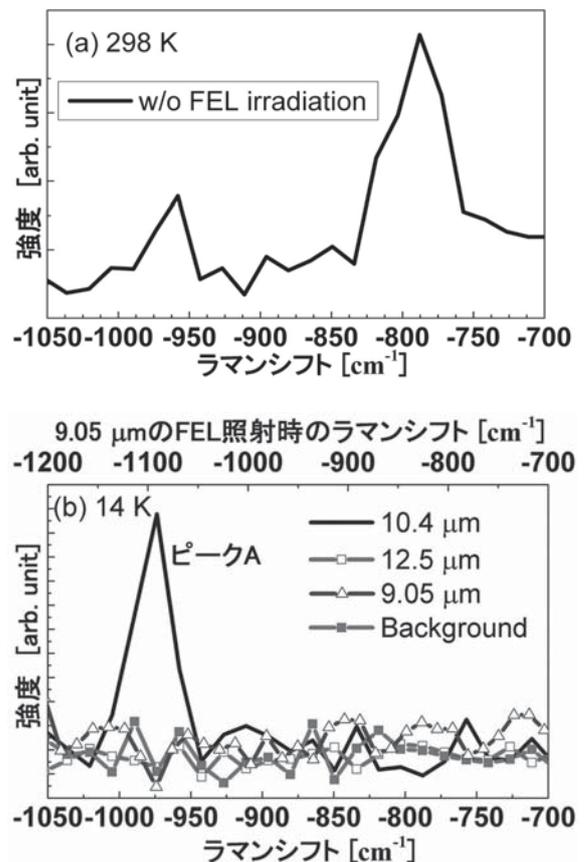


図 6 (a) 298 K のときに MIR-FEL 未照射で観測されたスペクトル。 (b) 14 K のときに MIR-FEL 照射・未照射の条件で観測されたスペクトル¹²⁾

観測されなかったことから、ピーク A は、赤外吸収によって生じたことがわかる。

さらに、ピーク A が FEL と Nd-YAG レーザーによる和周波であったとすれば、 $12.5 \mu\text{m}$ と $9.05 \mu\text{m}$ の FEL を照射したときに強度の違うピークがそれぞれの波長に対応する波数 ($12.5 \mu\text{m} : 800 \text{ cm}^{-1}$, $9.05 \mu\text{m} : 1100 \text{ cm}^{-1}$) に観測されると考えられる。特に、和周波はレーザーの波長が実準位のエネルギーと一致しているときに共鳴的に増幅されるため、振動準位と共鳴する $12.5 \mu\text{m}$ の FEL 照射時に和周波が発生すれば、高強度なピークが観測されると予想される。しかしながら、 $12.5 \mu\text{m}$ と $9.05 \mu\text{m}$ の FEL 照射時にピークが観測されなかった。よって、ピーク A は和周波発生により生じたピークではないといえる。

これらの結果より、ピーク A は、SiC が FEL の吸収による選択的格子振動励起により発生したアンチストークスラマン散乱光であると考えられ、中赤外レーザーによる SiC の選択的格子振動励起が実証された。

4. バルク超伝導体を用いたアンジュレータ

放射光施設で利用可能な波長は、電子ビームの高エネルギー化、挿入光源の強磁場・短周期化により短波長化が進み、第三代放射光施設の登場により、高輝度の硬 X 線利用が活発になってきた。その一方、近年 3 GeV 級の中型放射光施設の建設計画が世界各地で進んでおり、軟 X 線領域までの波長帯を中心とした研究の比重が高まりつつある。

このような状況の中、京都大学では中型放射光施設でも基本波での硬 X 線発生を可能とすることを視野に入れ、バルク超伝導体を 10 ~ 20 K 程度の加速器用超伝導技術としては比較的高い温度まで冷却することで得られる 10 kA/mm^2 程度の高い臨界電流密度に着目し、新型アンジュレータの開発研究を進めている¹³⁾。

図 7 に新型アンジュレータの模式図を示す。このアンジュレータは、ソレノイド中にバルク超伝導体を周期的に配置した構造をもち、外部磁場を変化させた際にバルク超伝導体に励起される超伝導遮蔽電流により周期磁場を生成する。

これまでに、周期 10 mm 磁極間隔 4 mm の条

件で 0.85 T のアンジュレータ磁場の生成に成功し¹⁴⁾、図 8 に示すように永久磁石技術（冷却型、強磁性体ハイブリッド型）の磁場強度限界を超えることに成功している。

永久磁石技術を上回るものとして、超伝導線材技術も研究が行われている。近年、超伝導電線の実効電流密度の向上が見られているが、依然として超伝導線材型アンジュレータでは 4.2 K 以下の運用を想定しており磁極間隔の短縮が難しいほか、短周期化の観点からは、線材に必要なシースや基材のため特に周期 10 mm を下回る領域では強磁場・短周期化が困難であることが予想される。

磁場強度性能としては、永久磁石技術を上回ることに成功しているが、磁場精度においては超伝導材料特性の不均一性に起因する課題が依然とし

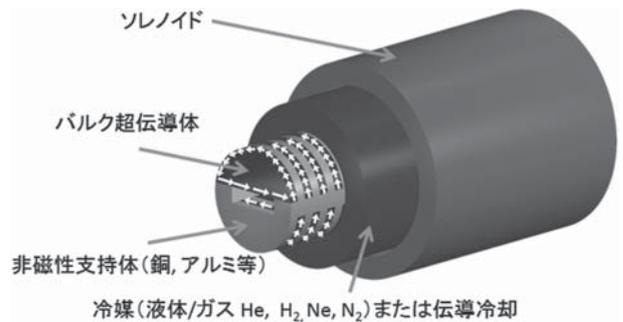


図 7 バルク超伝導体アンジュレータ概念図。外部ソレノイドで磁場を変化させるとバルク超伝導体内部に超伝導遮蔽電流（白矢印）が励起され、中心軸上に周期交替磁場が生成される

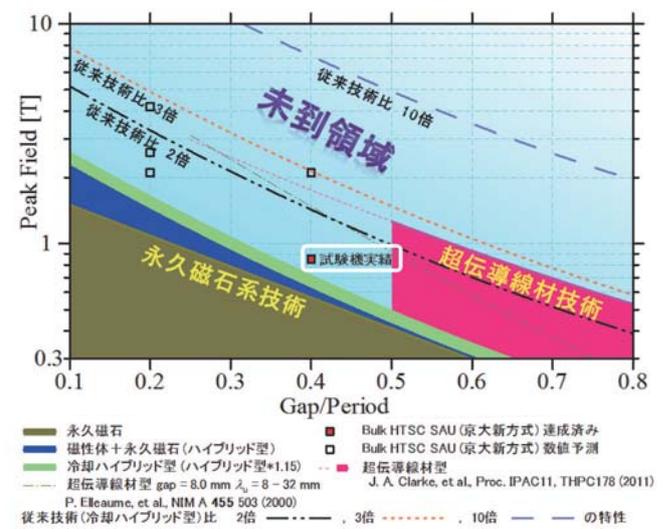


図 8 磁極間隔 / 周期でスケーリングしたピーク磁場強度の比較。Y 軸（ピーク磁場強度）を対数軸にとると、数値計算結果や実験結果は磁極間隔 / 周期の 2 次関数で良く近似できる

て残っており¹⁵⁾, 現在は磁性体シムやソーティングによる補償手法について研究を行っている。

5. ま と め

本稿では京都大学エネルギー理工学研究所における電子直線加速器を用いた中赤外自由電子レーザー装置の現在の状況と代表的な利用研究の紹介を行った。また, バルク高温超伝導体を用いた新しい短周期アンジュレータの提案と研究状況の紹介を行った。当研究所のような加速器研究を表に出し辛い機関において, 加速器の維持管理は困難であり, 大きな故障が生じた場合のバックアップは全く期待できない。実際にPFNコンデンサがパンクする故障が既に生じたが, 早稲田大学をはじめ多くの研究機関からの支援により何とか加速器運転が可能となった。この場を借りてお礼を申し上げるとともに, 今後の協力・連携をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 山崎鉄夫, “京都大学小型量子放射発生装置 KU-FEL”, 加速器 Vol. 2, No. 2, pp. 251-256 (2005).
- 2) 大垣英明, 紀井俊輝, 増田開, 吉川潔, 山崎鉄夫, “京都大学小型量子放射発生装置の現状”, 加速器 Vol. 5, No. 1, pp. 21-26 (2008).
- 3) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, H. Zen, S. Sasaki, T. Shiiyama, R. Kinjo, K. Yoshikawa, T. Yamazaki, “Lasing at 12 μm Mid Infrared Free Electron Laser in Kyoto University”, Jap. Jour. of Appl. Phys., Vol. 47, No. 10, pp. 8091-8094 (2008).
- 4) K. Masuda, T. Horii, S. Amazaki, T. Kii, H. Ohgaki, T. Yamazaki, K. Yoshikawa, “Transient beam loading effects due to back-streaming electrons onto a thermionic cathode in an RF gun”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 483, pp. 315-320 (2002).
- 5) C.B. McKee et al., “Computer Simulation of Cathode Heating by Back-bombardment in The Microwave Electron Gun”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, Vol. 296, pp. 716-719 (1990).
- 6) T. Kii, Y. Nakai, T. Fukui, H. Zen, K. Kusukame, N. Okawachi, M. Nakano, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshikawa, T. Yamazaki, “Reducing energy degradation due to back-bombardment effect with modulated rf input in S-band thermionic rf gun”, AIP Conf. Proc. Vol. 879, pp. 248-251 (2007).
- 7) H. Zen, T. Kii, R. Kinjo, S. Sasaki, T. Shiiyama, K. Masuda, H. Ohgaki, “Beam Energy Compensation by RF Amplitude Control for Thermionic RF Gun and Linac Based Mid-Infrared FEL”, Proceedings of EPAC08, pp. 1329-1331 (2008).
- 8) H. Zen, T. Kii, K. Masuda, R. Kinjo, K. Higashimura, K. Nagasaki, H. Ohgaki, “Beam Energy Compensation in a Thermionic RF Gun by Cavity Detuning”, IEEE transaction on nuclear science, Vol. 56, No. 3, pp. 1487-1491 (2009).
- 9) Y. Qin, H. Zen, X. Wang, T. Kii, T. Nakajima, H. Ohgaki, “Pulse duration and wavelength stability measurements of a midinfrared free-electron laser”, Optics Letters, Vol. 38, pp. 1068-1070 (2013).
- 10) 濱口宏夫, 平川暁子「ラマン分光法」学会出版センター (2002).
- 11) S. Nakashima, H. Harima, “Raman Investigation of SiC Polytypes”, Physica Status Solidi (a), vol. 162, Issue 1, pp. 39-64 (1997).
- 12) Kyohei Yoshida, Taro Sonobe, Heishun Zen, Kan Hachiya, Kensuke Okumura, Kenta Mishima, Motoharu Inukai, Hani Negm, Konstantin Torgasin, Mohamed Omer, Toshiteru Kii, Kai Masuda, and Hideaki Ohgaki, “Experimental demonstration of mode-selective phonon excitation of 6H-SiC by a mid-infrared laser with anti-Stokes Raman scattering spectroscopy”, Applied Physics Letters, Vol. 103, 182103 (2013).
- 13) T. Kii; R. Kinjo; N. Kimura; M. Shibata; M.A. Bakr; Y.W. Choi; M. Omer; K. Yoshida; K. Ishida; T. Komai; K. Shimahashi; T. Sonobe; H. Zen; K. Masuda; H. Ohgaki, “Low-temperature operation of a bulk HTSC staggered array undulator”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, 4100904 (2012).
- 14) R. Kinjo; M. Shibata; T. Kii; H. Zen; K. Masuda; K. Nagasaki; H. Ohgaki, “Demonstration of a high-field short-period undulator using bulk high-temperature superconductor”, Applied Physics Express, Vol. 6, 042701 (2013).
- 15) T. Kii; R. Kinjo; M.A. Bakr; Y.W. Choi; K. Yoshida; S. Ueda; M. Takasaki; K. Ishida; N. Kimura; T. Sonobe; K. Masuda; H. Ohgaki, “A study on field error of bulk HTSC staggered array undulator originated from variation of critical current density of bulk htscs”, Proc. FEL2010, pp. 648-651 (2010).