

# EVALUATION OF LASING RANGE WITH A 1.8 m UNDULATOR IN KU-FEL

Keiichi Ishida <sup>#,A)</sup>, M.A. Bakr<sup>A)</sup>, Yong-Woon Choi<sup>A)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, M. Omer<sup>A)</sup>, Kyohei Yoshida<sup>A)</sup>, Naoki Kimura<sup>A)</sup>, Takuya Komai<sup>A)</sup>, Marie Shibata<sup>A)</sup>, Kyohei Shimahashi<sup>A)</sup>, Hidekazu Imon<sup>A)</sup>, Heishun Zen<sup>A)</sup>, Taro Sonobe<sup>A)</sup>, Kai Masuda<sup>A)</sup>, Toshiteru Kii<sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
 Gokasho, Uji-City, Kyoto, 611-0011

## Abstract

In KU-FEL (Kyoto University FEL) 12-14  $\mu\text{m}$  FEL has been available by using a 40 MeV S-band linac and 1.6 m undulator. We are going to install 1.8 m undulator which was used in JAEA to extend the lasing range of KU-FEL. We measured the undulator field and evaluated the FEL gain to confirm the possible lasing range. The measured magnetic field showed large de-magnetization in several %. Numerical evaluation of the lasing range has been carried out by using GENESIS1.3 and the result showed the expected FEL gain with the 1.8-m undulator (10%) which was smaller than that with 1.6-m undulator (20%). We simulated a magnetic sorting for 1.8-m undulator and FEL gain was recovered to be (30%).

## KU-FEL 1.8 m アンジュレータでのレーザー発振波長領域の評価

### 1. はじめに

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装置(KU-FEL)では、中赤外域レーザーのエネルギー科学等への応用等を目指し、発振レーザー波長領域の拡大及びスペクトルの狭帯化を目的とした研究開発を行っている。

既存の 1.6 m アンジュレータを旧原子力研究機構の 1.8 m アンジュレータに交換することで、FEL のゲインの上昇と、これによる波長領域の拡大が期待される。アンジュレータの更新に伴う光共振器の再設計は終了し<sup>[1]</sup>、また導入後の FEL ゲインと発振波長領域の評価も終了した。しかしこれらの計算には、旧原子力研究機構で導入時に測定されたピーク磁場のデータを元にした、理想磁場により行われている。そのため実際の導入後の FEL ゲインと発振波長域は変化すると予想される。そこで再度磁場を測定し、そこから FEL ゲインの計算を行った。

### 2. KU-FEL

#### 2.1 現在の状況

KU-FEL では 2856 MHz(S バンド)で駆動する 4.5 空洞の熱陰極型高周波電子銃を使用し、電子銃出口でマクロパルス長 5.2  $\mu\text{s}$ 、最大エネルギー約 9 MeV の電子ビームが生成される。加速管までのビーム輸送系は、45° の偏向電磁石 2 台とトリプレット型四重極電磁石が配置されている。

加速管は S バンドで駆動し、有効長は 2.9 m で、20 MW の高周波源により、最大 40 MeV まで加速可能である。加速された電子ビームは 60° の偏向電磁石 3 台とダブルレット型四重極電磁石を配置した 180° アークによってバンチ圧縮され、マッチング

用トリプレット型四重極電磁石を通過してアンジュレータ入口へと入射される。

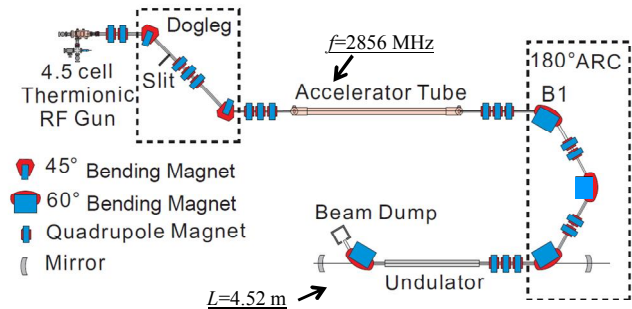


図 1. KU-FEL の概観図

既存の Halbach 型アンジュレータは全長 1.6 m、周期数は 40、最大  $K$  値は 0.99 である。また光共振器は 4.52 m であり、ここに金コート銅ミラーが上流下流に一枚ずつ設計されている。それぞれの曲率半径は、3.030 m 及び 1.872 m であり、上流ミラーには直径 2.00 mm の FEL 取り出し用カップリングホールがつけられている。現在までに 12 から 13  $\mu\text{m}$  での FEL 発振を確認している<sup>[2],[3]</sup>。

#### 2.2 アンジュレータの導入計画

現在 KU-FEL では、発振される FEL の波長領域の拡大と FEL ゲインの上昇を目的とした、1.6 m アンジュレータから 1.8 m アンジュレータへの更新が計画されている。

既存の 1.6 m アンジュレータから旧原子力研究機構の 1.8 m アンジュレータへの交換で、現在の 2 倍程度の FEL ゲインが見込まれている。導入予定のアンジュレータの仕様を表 1 に示す。

<sup>#</sup> ishidaki@iae.kyoto-u.ac.jp

表 1. 1.8 m アンジュレータの仕様

全長	1.8 m
周期数	52
周期長	33 mm
最小ギャップ長	15 mm
軸上最大磁場	0.5 T
最大 K 値	1.54

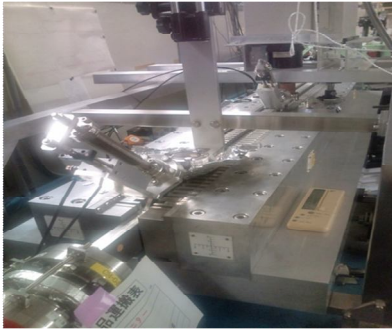


図 2. 1.8 m アンジュレータ

アンジュレータの更新に伴い光共振器の再設計も行ない、キャビティ長は 5.04 m、上流ミラー曲率半径は 2.456 m、下流ミラー曲率半径は 2.946 m、カップリングホール径は 1.00 mm となっている。

### 3. 磁場測定

#### 3.1 磁場測定

2 m リニアステージ、3 軸ガウスメータ(LakeShore 社 460)を用いて 1.8 m アンジュレータの磁場測定を行った。リニアステージの先にガウスメータのプロブを取り付け、リニアステージを 1 mm 幅で動かして磁場測定、という作業をアンジュレータの両端まで繰り返し行った。一回の測定は、1 mm 移動してから 200 ms 止め、100 ms 間隔で 5 回連続測定し、その平均値をその位置での測定結果とした。



図 3. 2 m リニアステージ

リニアステージの構造上、アンジュレータのギャップが 25 mm 以上でしか測定できなかったの

で、ギャップを 25 mm にして測定した。その結果を図 4 に示す。

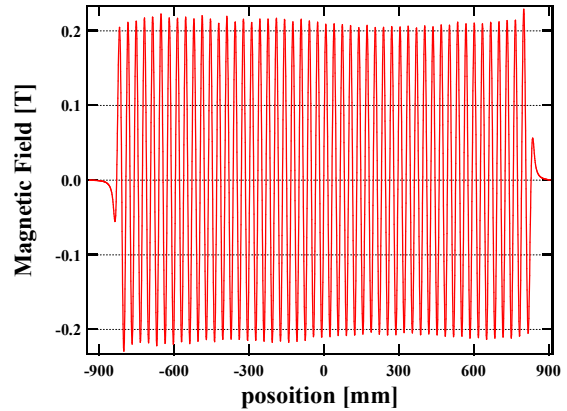


図 4. アンジュレータ磁場

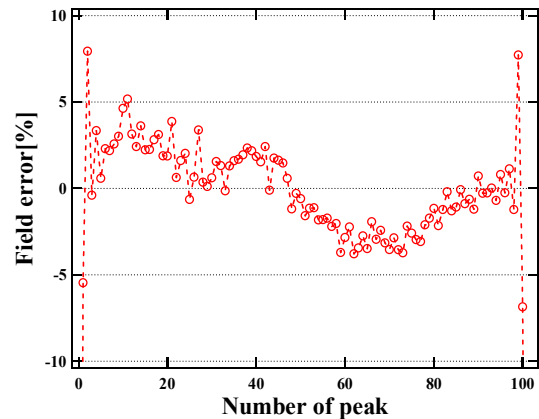


図 5. 磁場エラー

この結果からアンジュレータ中心から後ろ 600 mm 程度に渡って大きな減磁がみられた。この位置は、原子力研究機構で使用されていた当時のビームプロファイルモニター的位置と一致しており、電子ビームやそれにより発生した放射線による減磁だと推定される。

測定したピーク磁場の平均値を中心としてプロットしたものが図 5 であり、平均値を中心として上下に 3.5%程度ずつ変動があることがわかる。これを放射線による減磁と考えると、その大きさは約 7%と見積もられる。

### 4. 交換後の FEL 発振シミュレーション

#### 4.1 計算コード

計算コード GENESIS1.3<sup>[4]</sup>を利用して FEL ゲインを計算した。ここで GENESIS1.3 は共振器型 FEL には対応しておらず、1 パスの計算しかできなかったため、当研究グループで改良したものを利用した。改良点としては、出力された数値を新たな入力値として次のパスを計算し、マルチパスのシミュレート

を行っている点である。またアンジュレータを出た光は共振器内の自由空間を伝播し、一对の共振器ミラーに反射して、再びアンジュレータに戻ってくる。この一連の計算を繰り返すことで、FELの増幅過程をシミュレートする。ミラーのアウトカップリングによる損失の計算において、回折損失と同様にホール内の電場をゼロにすると数値計算上の問題が生じる。一方で損失の算出を、ホール上の光パワーを積分し、それとミラー上の全光パワーの割合から算出する透過型とすると、正確に取り出した光の特性を評価できないため、今後の調査に支障が生じる場合がある。このためここでは、強度分布に干渉縞が発生する問題はあるが、ホール内の電場をゼロにし、ホール近傍を反射率として次式で表される緩やかな関数を用いて計算した。

$$R(r) = 2 \left( \frac{r}{R_a} \right)^4 - \left( \frac{r}{R_a} \right)^8 \quad (1)$$

計算コードにはダクト形状を取り込めるようになっており、再設計した値を取り込んだ<sup>[1]</sup>。またFELゲイン計算には、KU-FELの実測値を基にアンジュレータパラメータに最適化された電子ビームパラメータを用いた。

表 2. 電子ビームパラメータ

規格化エミッタンス(x)	3.5 πmm mrad
規格化エミッタンス(y)	3.5 πmm mrad
エネルギー幅	0.5%
x 方向ビーム半径	0.6 mm
y 方向ビーム半径	0.4 mm
Twiss parameter α <sub>x</sub>	4.8
Twiss parameter α <sub>y</sub>	0

#### 4.2 FEL ゲイン計算

我々はFELゲインの上昇を目指しているので、最もゲインが上昇すると考えられる、ギャップ 15 mm で、電子ビームのエネルギーを 20 MeV から 40 MeV まで変化させた時のシミュレーションを行った。入力する磁場データはギャップ 25 mm の測定結果とギャップ 15 mm でのピーク磁場を基に、同じプロファイルを持つとして求めたデータを使用した。磁場のエラーが大きいため、電子ビーム軌道が曲がっており、よりダクトの中心を走るように、また出力が向上するように x 方向に偏向し、ビーム位置をシフトさせてシミュレートした。その一例として、ギャップ 15mm、エネルギー40 MeV での電子ビーム軌道を図 6 に示す。また比較のために、そのピーク磁場で理想的な磁場の時の計算も行った。磁場が平均磁場から±3.5%程度の幅を持っているので、

その範囲で一様に磁場を振ったものを、ソーティングの一例と仮定して、シミュレートした。それらのFELゲインの結果を図 7 に示す。

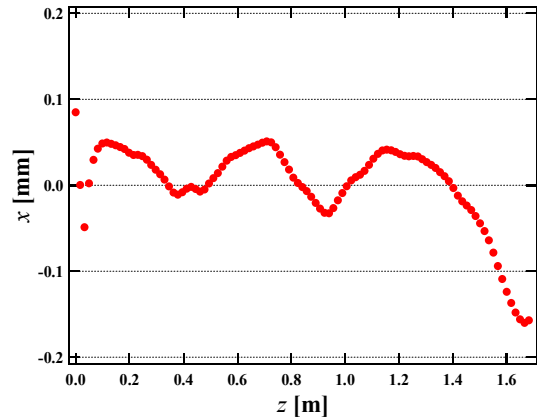


図 6. 補正した電子ビーム軌道

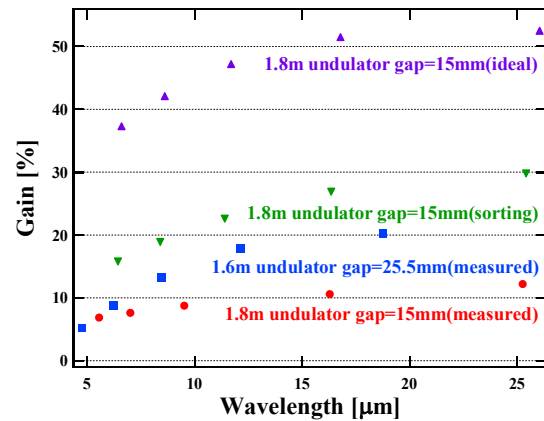


図 7. FEL ゲイン

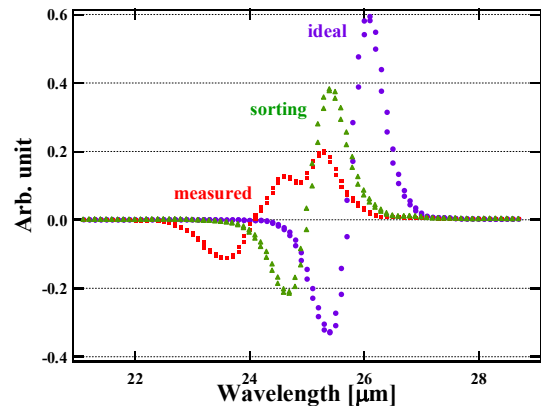


図 8. 1 パスの FEL ゲインカーブ

計算の結果から、測定磁場から求めたFELゲインは非常に小さくなり、既存の1.6 m アンジュレータのFELゲインより小さくなった。一方ソーティングを仮定したFELゲインは1.6 m のゲインより大きくなった。

FELゲインが小さくなる理由として考えられるのは、図 8 に 1 パスでのゲインカーブがスプリットしていることが考えられる。スプリットした理由とし

では、減磁している付近の磁場としていない付近の磁場に大きな差があり、その磁場の違いにより増幅される波長が異なるためだと考えられる。この考察から、FEL ゲインを増幅させるためには、アンジュレータ全体に渡ってより均一に磁場を分布させる必要があり、その対策としてソーティングやシミングが考えられる。

## 5. まとめ

KU-FEL では FEL のゲインの上昇と、これによる波長領域の拡大を目標に原子力研究機構で使用されていた 1.8 m アンジュレータの導入を計画している。このためにアンジュレータ磁場の測定を行い、FEL ゲインの計算を行った。

この結果、アンジュレータ磁場は平均ピーク磁場から±3.5%程度の幅を持っていることが分かった。特にビームプロファイルモニター付近で大きな減磁が見られることから、モニター挿入に伴う放射線による減磁だと推定される。

改良した計算コード GENESIS1.3 による、光共振器の構造を取り入れた FEL ゲインの計算を行った結果、アンジュレータの交換により、現状のままでは FEL ゲインの上昇は見込めないものの、ソーティングやシミングによる磁場の補正をすることで FEL ゲインの上昇と波長領域の拡大が期待されることがわかった。

## 参考文献

- [1] S. Ueda et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.398-401 (2010)
- [2] H. Ohgaki et al., Jap. Jour. of Appli.Phys., Vol.47, No.10, pp.8091-8094 (2008)
- [3] T. Kii et al., Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, pp.2205-2205 (2010)
- [4] S. Reiche, Nucl. Instrum. Methods , A429, 243 (1999)