

# KU-FEL における電子ビーム安定性に関する研究

## STUDY ON ELECTRON BEAM STABILIZATION IN KU-FEL

奥村健祐<sup>#</sup>, 全炳俊, 犬飼元晴, 梅村勇輔, 三島健太, Torgasin Konstantin, Hani Negm, Mohamed Omer,  
吉田恭平, 紀井俊輝, 増田開, 大垣英明

Kensuke Okumura<sup>#</sup>, Heishun Zen, Motoharu Inukai, Yusuke Tsugamura, Kenta Mishima, Torgasin Konstantin,  
Hani Negm, Omer Mohamed, Kyohei Yoshida, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

### Abstract

Stable electron beam is essential for stable FEL operation. In Kyoto University MIR-FEL facility (KU-FEL), a BPM (Beam Position Monitor) system consisting of six 4-button electrode type BPMs was installed for monitoring of the electron beam position. The fluctuation of the electron beam position has been observed in horizontal and vertical directions. The origin of the beam position fluctuation is not clarified. In horizontal direction, the main fluctuation source is expected to be the energy fluctuation. As the one of candidate of the energy fluctuation, the cavity temperature of the RF gun has been suspected because the gun is operated in detuned condition which enhances beam energy dependence on the cavity temperature. Another candidate is the fluctuation of the RF power fed to the gun. The both effects were experimentally investigated. We observed a small fluctuation of the beam energy corresponding the cavity temperature fluctuation. A large fluctuation of the beam energy corresponding the large fluctuation of the RF power was also observed. The large RF power fluctuation was induced by change of temperature of ferrite slabs in the 4-port circulator. A temperature-stabilized water circulation system will be prepared for the ferrite slabs to stabilize the RF power fed to the RF gun.

### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、エネルギー科学への応用を目指して、中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)の電子ビームの安定性の向上を目的とした研究を行っている<sup>[1]</sup>。FEL を安定に発振させるには電子ビーム軌道を安定化させることが重要である。そこで我々は KU-FEL に 4 つの電極をもつ BPM (Beam Position Monitor) を導入した。これにより、非破壊で電子ビームの位置を計測することが可能となった。また、計測された位置情報を元にフィードバック制御を導入することで電子ビーム位置の変動を低減し発振する FEL のパルスエネルギーの安定性を向上させることに成功した<sup>[1]</sup>。しかし、フィードバック制御により安定化はある程度可能となったものの、電子ビームの水平方向位置変動の主要因であるエネルギー変動の原因は明らかになっておらず、FEL 安定化の根本的な解決には至っていない。そこで我々は更なる安定性の向上のために、エネルギー変動の要因について調査を行った。

### 2. BPM システム

KU-FEL 装置は 4.5 空洞の熱陰極型高周波電子銃、3m の加速管、1.8m の Hybrid アンジュレータと光共振器からなる<sup>[2]</sup>。KU-FEL では、まず 4.5 空洞の熱陰極型高周波電子銃から発生した電子が加速管において加速させられる。その電子をアンジュレータ部において蛇行させることにより放射光が発生し、その放射光と電子の相互作用によりレーザーを発振させる仕組みとなっている。KU-FEL の概略図を Figure 1 に示す。

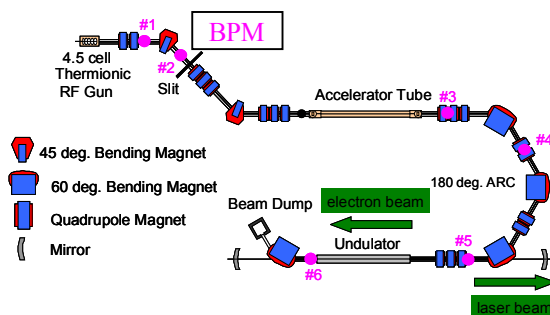


Figure 1: Layout sketch of KU-FEL.

Figure 1 において#1-#6 はそれぞれの BPM の位置を示す。各 BPM から得られた電子ビーム位置の計測結果を基にビーム位置フィードバックシステムが構築されている<sup>[1]</sup>。その中でも電子銃から加速管入口にかけての低エネルギー部におけるフィードバックシステムについて言及する。まず、BPM #2 で得られた電子ビームの位置変動の情報を基に、電子ビームの平均エネルギーが一定となる様にクライストロン高圧電源の設定値（以降クライストロン電圧と呼ぶ）を調整するよう制御が行われている。このフィードバック制御により大幅にビーム位置の変動が低減される。この際、補償することができなかった微小なビーム位置変動分はステアリングマグネットを用いたフィードバックによって補償される。これら 2 つのフィードバックを組み合わせることにより低エネルギー部の電子ビーム位置変動を大きく低減することが可能となった。

## 2. 高周波電子銃でのエネルギー変動要因

エネルギー変動は RF 電子銃の共振空洞内の電場変動によって発生しており、その電場変動を起こす要因としてはビーム負荷の変動や空洞温度変化、RF 電子銃に入力されるマイクロ波の強度変化が挙げられる。ここで、KU-FEL では共振空洞内の電荷量が一定になるようにフィードバック制御を行っているためビーム負荷変動によるエネルギー変動は小さいと考えられる。一方、RF 電子銃における Back-bombardment 現象に伴い急激なビーム電流の増加と、これに伴うエネルギー低下が起こる。これを打ち消すため、KU-FEL 空洞の共振周波数をマイクロ波の周波数よりも 200 kHz 程、低い周波数に設定した Detuning 状態で運転を行っている<sup>[3]</sup>。そのため空洞の共振周波数とマイクロ波の周波数が同じ条件で用いられる通常の高周波電子銃と比較して空洞の共振周波数の変化がエネルギーの変動に繋がりがやすい。ここで、共振空洞の温度が変化すると空洞の内径が変わるため、共振周波数の変化に繋がる。1°Cの温度変化が生じると共振周波数は45kHz変化し、結果として772keVのエネルギー変動を伴う。そのため、共振空洞の温度変化によるエネルギー変動が大きいと考え、まずその影響を調査した。

## 3. エネルギー変動の空洞温度依存性

共振空洞の温度を計測するため、温度センサーとして、共振空洞の外壁に温度係数 1.3851 ppm/°Cの白金測温抵抗体を取り付けた。測温抵抗体の抵抗値を KEITHLEY 社製の 2400 型 Source Meter を用いて 4 端子法により測定する事で温度の測定を行った。ここで、クライストロン電圧の相対変化はフィードバック制御を行わなかった際の空洞内電場の相対変化と相関を持った量として考える。測定結果を Figure 2 に示す。ここで(a), (b)はそれぞれ晴天時と雨天時における空洞温度とクライストロン電圧との関係を表している。(a)の結果より共振空洞の温度の変化に対してクライストロン電圧が同様の変化を示していることが確認できた。

一方、(b)の結果では(a)で確認できた空洞温度とクライストロン電圧の関係性が確認できず、代わりにノコギリ波状の変動がみられた。このことから空洞温度変化よりも支配的なエネルギー変動要因がノコギリ波状の変動を起こしたといえる。ここでこのノコギリ波状の変動であること、雨天時にのみ観測できることから、クライストロンのコレクタやソレノイドコイル、RF サーキュレータ、ビームスリット等を冷却している冷却水の温度変化が原因であると考えた。これは上記の冷却水を冷却するためのチラーが設定温度に対する冷却水温度の高低で ON-OFF を繰り返すものであり、かつ雨天時は外気温が低いいため ON-OFF を繰り返しやすくノコギリ波状の変動を生じているためである。これを確認した結果を Figure 3 に示す。この結果から冷却水とクライストロン電圧の関係性が確認できた。

以上の実験から空洞温度変化とエネルギー変動の関係性が確認できたのと同時に、さらに大きなエネ

ルギー変動を及ぼす要因が冷却水に関連する機器から生じていることが確認できた。

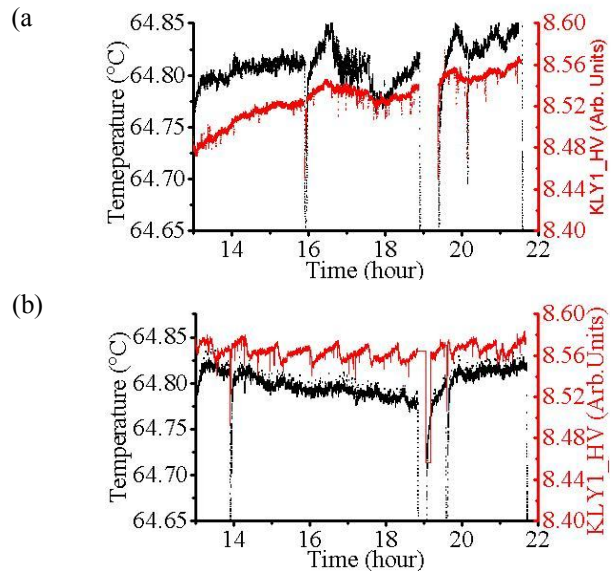


Figure 2: Effect of Cavity temperature on beam energy (a) on clear day (b) on rainy day.

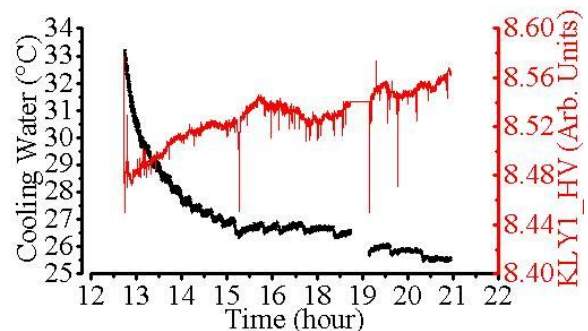


Figure 3: Relation between Cooling Water and Klystron High voltage.

## 4. 変動要因の解明

### 4.1 冷却水によるマイクロ波強度の変動

電子銃へ供給されるマイクロ波強度変動に関係すると思われる冷却水の循環経路の概略図を Figure 4 に示す。冷却水は図のようにクライストロン、クライストロン用ソレノイド、RF 窓、サーキュレータを冷やすために流れている。そのためそれらの中に電子ビーム位置の変動を及ぼす機器があるといえる。

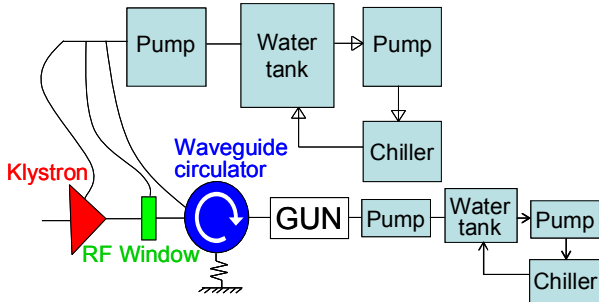


Figure 4: Circulation route of cooling water.

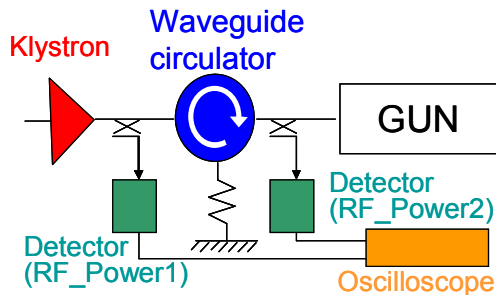


Figure 5: Layout sketch of measuring system of the behavior of circulator.

ここで、サーキュレータが電子ビーム位置の変動要因として疑わしいと考え、Figure 5 に示すように検波器 (Agilent 423B DETECTOR) と Tektronix 社製 DPO3014 デジタルフォスファオシロスコープを用いて、サーキュレータの前後でのマイクロ波強度の変化を測定した。この際、変動を見やすくするためにフィードバック制御を切り、またチラーの電源を OFF にして能動的に温度変化を引き起こした。結果を Figure 6 に示す。

Figure 7(a) の結果からサーキュレータの出力側において冷却水の温度変化に起因したマイクロ波強度の大きな変動がみられた。また冷却水温度の上昇に伴い、電子銃に輸入されるマイクロ波強度も上昇を続けており、45°C以上の領域にサーキュレータでのロスが最小となる最適な冷却水温度が存在すると考えられる。

また(b)の結果から、BPM #2 での電子ビームの位置変動と電子銃に輸入されるマイクロ波強度の変動に相対関係が確認できる。以上の結果から、サーキュレータの冷却水の温度変化を低減することで電子ビームの位置変動を低減することが可能であるといえる。

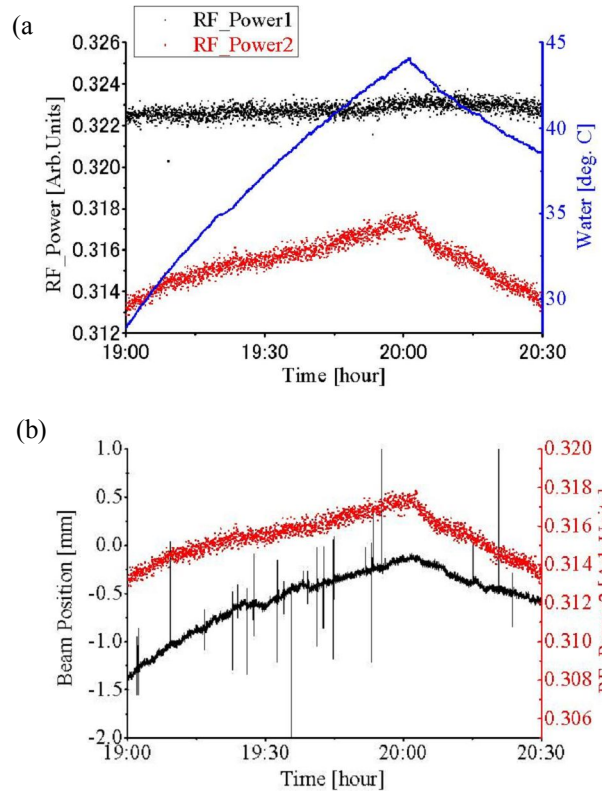


Figure 6: RF input power relative to (a) cooling water or (b) beam position at BPM#2.

#### 4.2 サーキュレータのマイクロ波強度変動要因

KU-FEL で用いられている位相器型 4 ポートサーキュレータの構造を Figure 7 に示す。サーキュレータ内部では、図のようにポート 1 から入力されたマイクロ波は 90 度ハイブリッドで二つの経路に分けられ、それぞれ逆方向に励磁されたフェライトの入った導波管を進む。上側の導波管内で生じる位相遅れは下側の導波管内よりも 90 度大きくなる様にフェライトが上側と下側で逆方向に励磁されている。上下の導波管を通ったマイクロ波は Magic-T で結合される。Magic-T では同相成分は図の GUN 方向のポート 2 に現れ、直交成分はポート 4 に出力される。この為、ハイブリッドも含めた上下の経路での位相差が 0 になった際に最も大きなマイクロ波が電子銃に供給され、この時、ポート 4 に出力される電力は最小となる。この位相差はフェライトの特性と印加磁場により決まる。今回観測されたマイクロ波強度変動は冷却水の温度変化によりその冷却水により冷却されているフェライトの特性が変化したために引き起こされたと考えられる。

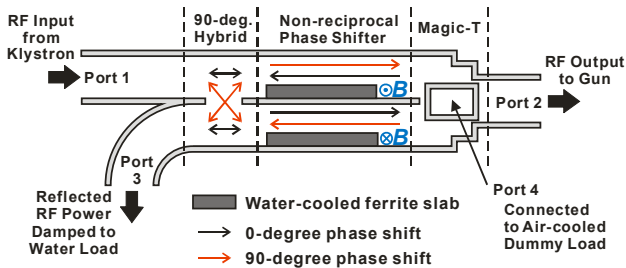


Figure 7: Structure of 4-port waveguide circulator.

### 5.まとめと今後の予定

電子ビームの更なる安定化を目指し、電子ビーム変動の要因の解明を行った。調査の結果、まず電子ビームエネルギーと空洞温度の明らかな相関を観測するとともに、より大きな変動要因があることが明らかとなった。そこで、さらに調査を進めたところ、その原因が冷却水の温度変化による RF サーキュレータ内部のフェライトの特性変化によるものであることが明らかとなった。

今後は電子ビーム変動を抑制するために、現在の循環経路から切り離し、サーキュレータの冷却水温度の変動が小さくなるよう他の冷却水を使用することを考えている。それに伴い、サーキュレータ部で

のマイクロ波損失を最小限にできる冷却水温度を調査し、最適な運転状況達成できる温調システムの設計・製作を行う予定である。これによって、電子ビームエネルギーの大きな変動要因であったマイクロ波強度の変動が飛躍的に抑制され、より安定な FEL 装置の実現に貢献できると考えている。

### 参考文献

- [1] H. Ohgaki, H. Zen, Y. W. Choi, H. Imon, T. Kii, R. Kinjo, T. Konstantin, K. Masuda, H. Negm, K. Okumura, M. Omer, M. Shibata, K. Shimahashi, K. Yoshida, "DEVELOPMENT OF BEAM POSITION FEEDBACK CONTROL SYSTEM IN KU-FEL", Proceedings of IPAC2013, pp.2968-2970 (2013).
- [2] H. Zen, K. Okumura, K. Shimahashi, M. Shibata, H. Imon, T. Konstantin, H. Negm, M. Omer, K. Yoshida, Y.W. Choi, R. Kinjo, M. A. Bakr, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, "IMPROVEMENT OF KU-FEL PERFORMANCE BY REPLACING UNDULATOR AND OPTICAL CAVITY", Proceedings of FEL2012, Nara, Japan, pp. 449-452 (2013).
- [3] 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", Nuclear Science, Vol. 56, Issue 3, pp.1487-1491, (2009).