

## コンパクト ERL-FEL 用アンジュレータのビーム軌道補正 BEAM ORBIT CORRECTION OF UNDULATORS FOR COMPACT ERL-FEL

江口 栄<sup>#, A)</sup>, 阿達正浩<sup>A)</sup>, 加藤龍好<sup>A)</sup>, 塩屋達郎<sup>A)</sup>, 土屋公央<sup>A)</sup>  
Shu Eguchi<sup>#, A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>, Tatsujiro Shioya<sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

We have stably operated two undulators, U01 and U02, for the free electron laser at the infrared region (IR-FEL) at the compact Energy Recovery Linac. The IR-FEL expected to be a promising light to process various. However, the present available electron beam energy for IR-FEL is limited to 17.5 MeV which is quite lower than the two other light source synchrotrons at KEK: 2.5-GeV PF ring and 6.5-GeV PF-AR. In a low energy beam, the larger orbital shifts inside the undulator caused by the slight error of the magnet array field and the environmental magnetic field. Therefore, in addition to the optics correction electromagnets, two sets of orbit correction coils were installed surrounding the undulator vacuum duct. There are two pair coils: upstream and downstream pairs. This report describes the details of the correction coil, the horizontal beam position correction method using the movable profile monitors installed at three locations in each undulator chamber, and the measurement results of the orbit correction.

### 1. はじめに

KEK のエネルギー回収型ライナックの原理実証機、コンパクト ERL において各種樹脂材料の加工に有用な光源となる 2 つのアンジュレータ U01 および U02 の運用を 2020 年より開始している[1, 2]。Figure 1 にアンジュレータ U01 および U02 を示す。Figure 1 の左奥側から順にアンジュレータ U01、アンジュレータ U02 が設置されている。波長 10~20 μm の範囲での IR-FEL を発振させるために、U01 および U02 では、周期長 24 mm、全長 3 m のプラナー・アンジュレータとして設計しており、タンデムに配置して使用する。アンジュレータ FEL 波長の制御は、一般的に広く採用されている磁石列間距離(ギャップ)の調整によるものではなく、磁石列間距離を 10 mm 固定として、下部磁石列のみビーム軌道と平行にスライドして磁石列位相を調整する APU(adjustable phase undulator)[3] 方式を採用している。なお磁石列位相は ±12 mm の範囲で調整可能となっている。



Figure 1: Photograph of the undulator U01 & U02.

アンジュレータを運用する上で位相変更時のアンジュレータ内の軌道変動を抑えることは安定した FEL を得るために重要である。コンパクト ERL の電子ビームエネルギーは 17.5 MeV と低く、磁石列のわずかな誤差磁場や環境磁場等によるアンジュレータ内部での無視できない軌道変動が予想される。そこでリングの補正電磁石に加えてアンジュレータ上流部と下流部に分けて 2 組の軌道補正用コイルをそれぞれ設置することで隨時軌道を補正することを考えた。各アンジュレータチャンバー入口、中央、出口と各チャンバー後方の 4ヶ所、合計 8 台の可動式プロファイルモニター[4]で検知した軌道変動を隨時補正する。本稿では軌道補正用コイルの詳細と軌道補正用コイルを用いた軌道補正の手法、および軌道補正用コイルの電流値の算出手法、そこから求めた電流値を使用して位相変更動作における電子ビームの軌道補正の測定結果について報告する。

### 2. 軌道補正用コイル

Figure 2 内の白い配線が軌道補正用コイルであり、アンジュレータ磁石列両側面及び上下方向に設置している。軌道補正用コイルの線径は 1.25 mm、巻き数は 10巻、定格電流値は 3 A である。Table 1 に軌道補正用コイルの各パラメータを示す。全長 3 m の各アンジュレータチャンバー中央を境に上流部と下流部に分けて水平垂直それぞれ 2 対の対向コイルを設置している。なお電子ビーム垂直方向に対しての収束力の影響により垂直方向の補正是必要ないため、水平方向の軌道補正用コイルのみを使用し水平ビーム位置補正を行う[5]。各空芯コイルは、定格 ±3 A の両極電源に接続され、0.1 mA の分解能で励磁電流をリモート制御している。アンジュレータの上部磁石列はアンジュレータ架台に固定されており、底部磁石列はステッピングモーターとロータリーエンコーダーで制御され、位相方向に 1 μm の位置分解能でリモート制御している。これらのアンジュレータ制御システムの概要を

<sup>#</sup> shu.eguchi@kek.jp

Table 1: Specifications of Orbit Correction Coil

線径	1.25 mm
巻き数	10
定格電流値	3 A
水平コイルの大きさ	1500 mm × 160 mm

Fig. 3 に示す。青矢印は電気配線による接続を示し、赤矢印はネットワーク接続を示す。



Figure 2: Photograph of the correction coil.

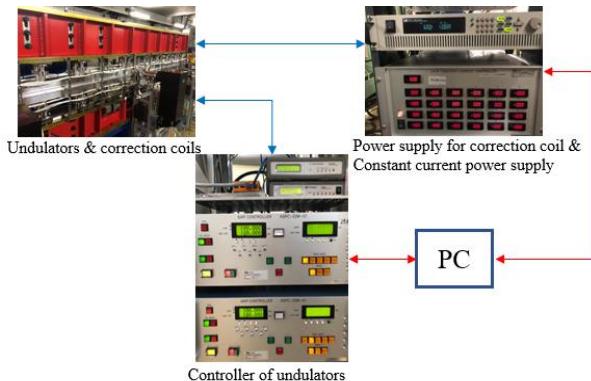


Figure 3: Configuration diagram of control of undulator & correction coil.

### 3. 水平ビーム軌道補正

#### 3.1 位相変更にともなう水平方向軌道変動

位相 0 mm でのビーム位置を基準として位相変化による軌道変動を測定した。ビーム座標変化による軌道変動を可動式プロファイルモニターに備わる蛍光板上に得たビームプロファイル画像から算出する。補正のため、アンジュレータチャンバーの入口部、中央部、出口部、アンジュレータ後方に設置された 4 つの可動式プロファイルモニターを使用した。Figure 4 に可動式プロファイルモニターの配置図を示す。位相は U01 では-12 mm ~ 0 mm、U02 では-12 mm ~ 12 mm の範囲で 3 mm ずつ

変化させた。Figure 5 に各位相での基準軌道からの軌道変動量を各モニターに対してプロットした。縦軸は基準軌道との差分、横軸は可動式プロファイルモニター名である。U01 では、位相-3 mm においてアンジュレータ後部で 1 mm 超の水平方向の軌道変動がある。また、U02 では位相-3 mm においてアンジュレータ後部で 1 mm 程度の変動があることがわかる。電子ビームの水平方向サイズ(標準偏差)は 0.6 mm であるので、アンジュレータ全域で軌道変動をこれより小さく抑制することを目標としている。

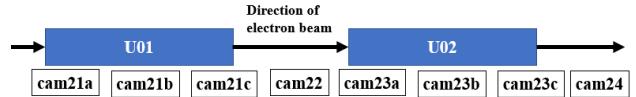


Figure 4: Layout of movable profile monitors.

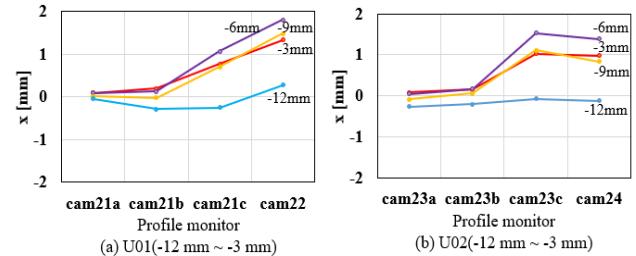


Figure 5: Horizontal beam position shift during phase change.

#### 3.2 軌道補正用コイル電流値の算出

水平ビーム位置補正を行うために必要な軌道補正用コイル電流値を算出するため、軌道補正用コイル電流値を変化させた際の水平ビーム位置を測定する。そのために、位相 0 mm において軌道補正用コイル電流値を以下の 3 パターンに設定して水平ビーム位置を測定した。

$$(Iu, Id) = (-0.5, 0), (0.5, 0), (0, 0.5) \quad (1)$$

$Iu, Id$  はそれぞれ上流部と下流部の軌道補正用コイルの電流値であり単位はアンペアである。それぞれの条件における水平ビーム位置の測定結果を Fig. 6 に示す。縦軸は基準軌道との差分、横軸は可動式プロファイルモニターによる座標位置を示す。この測定結果から各可動式プロファイルモニターにおける軌道補正用コイルの応答係数を算出できる。応答係数の算出は最小二乗法に基づいて Eq. (2) の  $w(n)$  を最小とする係数を求める。

$$w(n) = \sum_i [D(n)_i - \{A(n)Iu_i + B(n)Id_i + C(n)\}]^2 \quad (2)$$

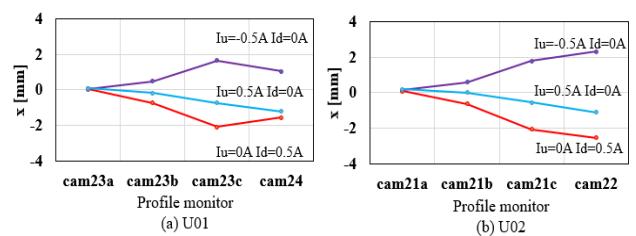


Figure 6: Horizontal beam position when the current value of correction coil is changed.

ここで、 $D(n)_i$ は各可動式プロファイルモニターにおける軌道補正用コイル電流値を変化させたときの水平ビーム位置の変位量、 $A(n)$ 、 $B(n)$ 、 $C(n)$ は軌道補正用コイルの応答係数、 $Iu_i$ 、 $Id_i$ は上流部と下流部の軌道補正用コイルの電流値、 $n$ は対象となる可動式プロファイルモニター数、 $i$ は軌道補正用コイル電流値の組み合わせパターン数である。求めた応答係数を用いて Eq. (3) の  $W(n)$ を最小とするような軌道補正用コイル電流値を各位相調整位置に対して求めることができる。

$$W(n) = \sum_n [E(n) - \{A(n)Iu + B(n)Id\}]^2 \quad (3)$$

ここで、 $E(n)$ は各可動式プロファイルモニターにおける水平ビーム位置の変位量、 $Iu$ 、 $Id$ はそれぞれ求める上流部と下流部の軌道補正用コイル電流値である。代表的な例として位相-3 mmにおける軌道補正用コイル電流値を求めると以下のような電流値になる。

$$(Iu_{u01}, Id_{u01}) = (0.126, 0.128) \quad (4)$$

$$(Iu_{u02}, Id_{u02}) = (0.186, 0.257) \quad (5)$$

ここで、 $Iu_{u01}$ 、 $Id_{u01}$ はU01の上流部と下流部の軌道補正用コイル電流値、 $Iu_{u02}$ 、 $Id_{u02}$ はそれぞれ U02 の上流部と下流部の軌道補正用コイル電流値である。また単位はいづれもアンペアである。

### 3.3 水平ビーム軌道補正

3.2 で求めた軌道補正用コイル電流値を用いて水平ビーム位置補正を行った。位相-3 mm時の位置補正結果を Fig. 7 に示す補正前の測定結果、補正で得られる計算値の分布、そして補正後の測定結果をあわせてプロットした。と基準軌道との差分値を示す。計算値と実測値は概ね一致しており、位置補正前と比べてビーム位置が補正できていることが分かる。補正後の水平方向軌道変動は U01 で最大0.1 mm程度に、U02 で最大0.2 mm程度に抑えられている。現在のところ、磁石列位相調整と軌道補正用コイル電流の設定は手動入力で行っている。これを自動化し、磁石列の位相変化に追従して軌道補正用コイル電流値を変えるフィードフォワードシステムの構築が今後の課題である。コンパクト ERL-FEL 運転の進捗状況に合わせてフィードフォワード制御を用いた水平ビーム位置補正システムを開発していく予定である。

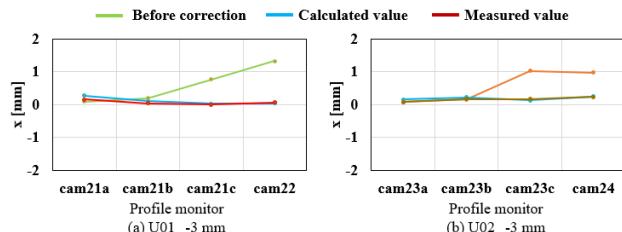


Figure 7: Result of horizontal beam position correction.

## 謝辞

本発表の一部は NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の成果に基づいています。

## 参考文献

- [1] K. Tsuchiya *et al.*, “Development of the tandem undulators for the cERL-FEL”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 – Aug. 3, 2019, pp. 1064-1065.
- [2] K. Tsuchiya *et al.*, “Magnetic adjustment of the tandem undulators for the cERL-FEL”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 850-852.
- [3] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, 1991, p. 391.
- [4] R. Takai *et al.*, “Beam diagnostic system modification for IR-FEL installation at the compact ERL”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 702-706.
- [5] K. Tsuchiya *et al.*, “Operation of the tandem Undulators for the cERL-FEL”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021.