

## cERL 自由電子レーザー用アンジュレータの磁場調整

### MAGNETIC ADJUSTMENT OF THE TANDEM UNDULATORS FOR THE CERL-FEL

土屋中央<sup>#, A)</sup>, 阿達正浩<sup>A)</sup>, 塩屋達郎<sup>A)</sup>, 江口柊<sup>A)</sup>, 加藤龍好<sup>A)</sup>

Kimichika Tsuchiya<sup>#, A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A)</sup>, Tatsuro Shioya<sup>A)</sup>, Shu Eguchi<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

At the KEK compact Energy Recovery Linac (cERL), we installed two undulators as a light source for the cERL-FEL project in this spring. The period length of undulators are 24 mm and the length are 3 m each other. We adopted cERL-FEL undulators as adjustable phase undulator (APU) with fixed gap of 10 mm. The magnetic adjustment of the undulators is important problem to transport the 17.5 MeV electron beam through undulators. We describe the magnetic adjustment of the cERL-FEL undulators in this report.

#### 1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構のエネルギー回収型ライナック (cERL) においては新たに赤外波長域の自由電子レーザーの開発が行われている。この計画では、各種樹脂材料の加工に有用な光源となる中赤外波長領域 (波長 10~20  $\mu\text{m}$ ) の波長可変な高出力レーザー光源を開発する事を目標とする。電子ビームエネルギーが 17.5 MeV である cERL において、この波長領域の放射光を発生させるために周期長 24 mm、長さ 3 m のアンジュレータを 2 台タンデムに配置して使用する[1]。今年度はこのためのアンジュレータの建設と磁場調整を行い、今年の 1 月と 4 月に cERL リング室へ順次インストールして、その運転を開始した。設置されたアンジュレータを Fig. 1 に示す。リング上流側は向かって左であり、上流側から順に U01、U02 が設置されている。



Figure 1: Photograph of the cERL-FEL undulator.

このアンジュレータは磁石列間ギャップが 10 mm 固定であり、波長変更のために上側磁石列を長手方向にスライドさせる adjustable phase undulator (APU)[2]方式を採用している。また上下磁石列を構成する各磁石は、長さ 3 m のアルミ磁石列取付け板へ直接クランプ留めしてい

る。このため U01、U02 の磁場調整においては磁石の入れ替えによる調整法を採る事ができない。そこで予め全ての磁石に対してビーム進行方向の磁場分布を測定してこれを重ね合わせることで良い磁場分布を得ること [3, 4] を目標に開発を行った。cERL においてアンジュレータ内部の電子ビームの輸送は、電子ビームエネルギーが 17.5 MeV と低いため重要な課題であり、良い磁石配列をはじめから決めることが重要な課題である。本稿では cERL-FEL 用アンジュレータの磁場調整とその結果について報告する。

#### 2. 個別磁石の磁場分布測定

cERL -FEL 用アンジュレータの磁石サイズは横幅 45 mm (x 方向)、高さ 20 mm (y 方向)、厚さ 6 mm (z 方向) である。これまでの PF における個別磁石の z 方向磁場分布測定は  $x=0$  でのみ行ってきた。これはアンジュレータ軸上での電子振幅が数ミクロンと小さく、磁石中央部 1 か所の磁場分布のみ調整すれば十分だったためである。しかし、今回の cERL -FEL 用アンジュレータ内部での電子軌道振幅は 150  $\mu\text{m}$  と大きいと、電子が通過するエリア全域での磁場分布を整える必要がある。そこで一つの磁石に対して、Fig. 2 に示すように  $x=\pm 150 \mu\text{m}$  の範囲で 4 回 z 方向の磁場分布を測定した。この時、垂直磁場 ( $B_y$ ) と水平磁場 ( $B_x$ ) を同時に測定している。これを用いて Eq. (1) で表す各磁石の持つ半周期毎の積分磁場を計算して磁石配列の計算に用いる。

$$BS_{x,y_j} = \left| \int_{j\lambda/2}^{(j+1)\lambda/2} B_{x,y}(z) dz \right| \quad (1)$$

この時 Fig. 2 に示すように、4 組の測定データから磁石水平方向の中央部 (C)、と左右両サイド部 (L, R) の 3 種類の積分磁場のグループを作成して、初期配列の最適化のパラメータとして使用する。これまでの最適化では中央部 (C) の半周期毎の積分値の平均からのずれの分散 ( $\Delta BS\_C$ ) を Eq. (2) で定義して使用していた。

$$\Delta BS\_C = \sum_{j=1}^{2N} (BS_j - BS_{Average})^2 \quad (2)$$

これに加えて、両サイドのデータを互い違いに用いて 2

<sup>#</sup> kimichika.tsuchiya@kek.jp

種類の分散を用いる。ここでは、Fig. 2 に図示した電子振幅 (赤線) 部分に相当する磁石位置での積分磁場の分散を  $\Delta BS_{-}(L+R)$  とし、その逆を  $\Delta BS_{-}(R+L)$  とする。この 3 種類の  $\Delta BS$  の和に加えて、軌道が真直ぐになるように各周期での軌道変位も最適化パラメータに採用している。

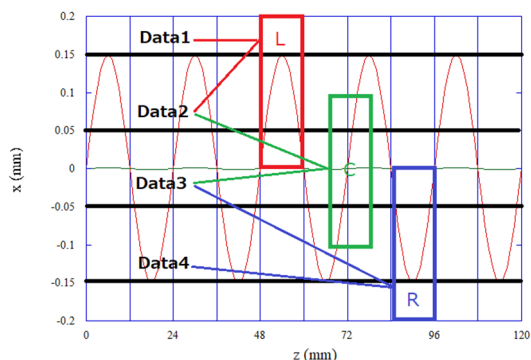


Figure 2: Horizontal measurement point of the magnetic blocks.

シミュレーションの結果から得られたアンジュレータ内部での計算軌道を Fig. 3(U01)と Fig. 4(U02)に示す。

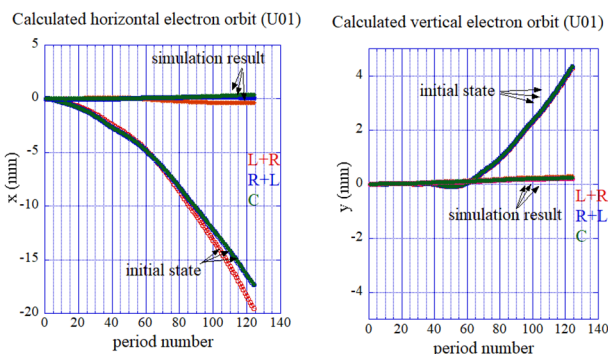


Figure 3: Simulation result of the orbit through the U01.

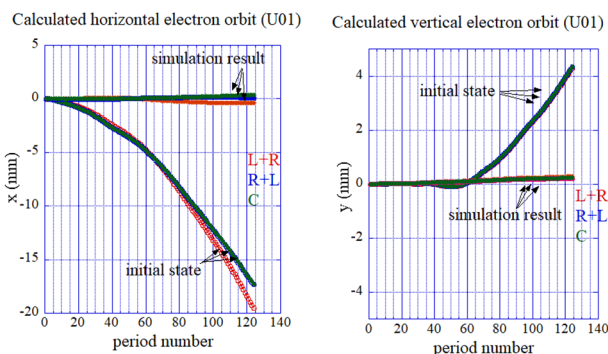


Figure 4: Simulation result of the orbit through the U02.

この最適化計算の結果、アンジュレータ内を電子ビームが振動する全領域で磁場を整える目的を満たす初期磁石配列を得ることに成功した。この配列をもとに 2 台のアンジュレータに対して磁石の組付けを行った。

### 3. 磁場測定の結果と cERL へのインストール

U01 は 2019 年 12 月に KEK へ搬入されて、磁場測

定を開始した。磁石列の精密位置調整はレーザー変位計で磁石列表面の相対位置を測定し、差動アジャスターによって上下磁石列の平行度を調整した。磁場測定中の U01 の写真を Fig. 5 に示す。



Figure 5: Photograph of U01 during the magnetic measurement.

差動アジャスターによる平行度調整のために、磁場測定ベンチにレーザー変位計 ( $\pm 80$  mm) のレーザー光を磁石列 Gap 中心でプリズムによって折り曲げて磁石表面の相対位置を磁石毎に測定した。この測定によって本来の位置より  $100 \mu\text{m}$  以上飛び出している磁石が多数存在することが判明した。これは磁石を磁石列取付けベームに直接クランプ留めしたため、この問題は全ての磁石面に圧力をかけた上でクランプの増し締めを行うことで解消したが、今後の同タイプのアンジュレータの設計には留意が必要である。同じ増し締め工程は U02 に対しても行っている。

磁石列の位置調整後に磁場測定を行い、初期配列最適化の効果を確認した。測定された磁場による計算水平軌道を Fig. 6 に示す。上述した磁石のクランプ方式の問題によって想定よりも磁場分布が大幅に乱れてしまうことを懸念したが、cERL-FEL アンジュレータ内で 17.5 MeV 電子ビーム輸送は十分可能であることが判った。

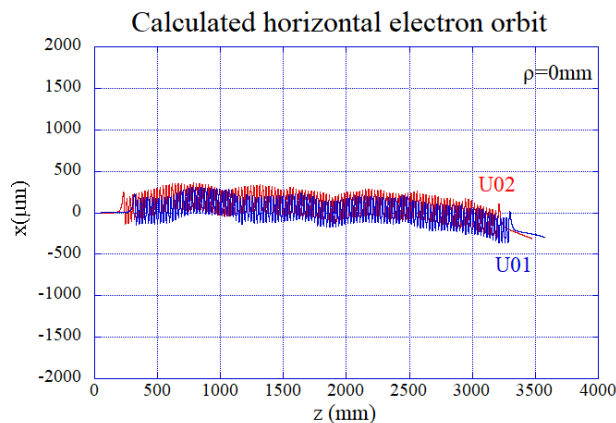


Figure 6: Calculated horizontal electron orbit through the undulators using measured magnetic distributions.

## PASJ2020 FRPP59

U01 は磁場測定の後、2020 年 1 月末に cERL リング内にインストールした。また 2 台目となる U02 の磁場調整は 2020 年 2 月から開始して 4 月に cERL リングにインストールした。2 台のアンジュレータのコミッショニング運転はそれぞれ 3 月と 6 月の FEL ビーム運転時に行われた。アンジュレータ内のビーム輸送は 2 台とも問題なく達成されて、波長 10~20  $\mu\text{m}$  の赤外光を磁石列の位相制御で発生し、その観測に成功している。また磁石列の位相によらず垂直方向の強い集束力が働いていることが観測されている。

### 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る。

### 参考文献

- [1] K. Tsuchiya *et al.*, PASJ2019, FRPI018 (2019).
- [2] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, 391 (1991).
- [3] K. Tsuchiya *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86, 043305 (2015).
- [4] K. Tsuchiya *et al.*, AIP Conf. Proc. 1741, 020023 (2016).