

## cERL-FEL 用タンデムアンジュレータの運転状況

### OPERATION OF THE TANDEM UNDULATORS FOR THE cERL-FEL

土屋公央<sup>#</sup>, 阿達正浩, 塩屋達郎, 江口柊, 加藤龍好

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

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

At the KEK compact Energy Recovery Linac(cERL), we installed two tandem undulators as a light source for the cERL-FEL project. The operation of these tandem undulators have been started from June of 2020. We found a strong undulator focusing force of the vertical direction during the operation of undulators. This vertical focusing force is characteristic effect for the cERL beam with the energy of 17.5MeV. We describe the operation status 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)において赤外波長域の自由電子レーザーの開発研究が進んでいる。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 mm)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。このために長さ 3mのアンジュレータを2台建設して、cERL リングに順次インストールした。2020年6月からは2台のタンデムアンジュレータとしてビーム運転が開始されている[1, 2]。この2台のアンジュレータは、最小ギャップが 10mm の固定 Gap であり、下側磁石列を長手方向にスライドさせることで光の波長を制御する adjustable phase undulator (APU)として使用し[3]、その磁場調整には個別磁石の磁場分布を重ね合わせる手法を採用した[4]。

。アンジュレータ真空チャンバーの垂直方向の開口は約 8 mmと狭く電子ビームのエネルギーも 17.5 MeV と低いために、計 6 mにわたるアンジュレータセクションの電子ビーム輸送には調整を要すると予想されたが、特に問題なくビーム輸送に成功した。その一方で、アンジュレータ磁石列の側面に配置した軌道補正コイルの内、垂直方向の軌道補正コイル(Fig. 1)の効果が見られなかった。これはアンジュレータ磁場の垂直方向の収束力が強く働いていることがその後の解析から判明した。

6月のFEL運転では観測された放射光強度は、事前のFELシミュレーションから期待された量を下回る結果となった。この原因としてcERL周回部で電子ビームにエネルギーチャープがついている可能性が指摘された。そのためアンジュレータをテーパ化し、このエネルギーチャープを補償する検討が行われた。

2020年の11月には、2台のアンジュレータの上部磁石列をシムにより長手方向に傾ける試みを行い、2021年春の運転ではテーパードアンジュレータとしての運用を行っている。

発表では cERL 自由電子レーザー用アンジュレータのコミッションングとその運用経験について報告する。

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

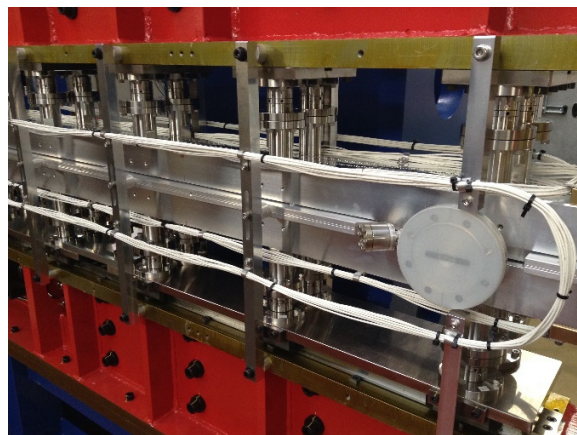


Figure 1: Vertical correction coil of undulator.

#### 2. スライド型アンジュレータの垂直集束力

APU 内部での磁場分布は次のように表らされる[3]。

$$B_y = -B_0 \sin(k\rho/2) \sin(kz - k\rho/2) \sinh(ky) - B_0 \cos(k\rho/2) \cos(kz - k\rho/2) \cosh(ky) \quad (1)$$

$$B_z = +B_0 \cos(k\rho/2) \sin(kz - k\rho/2) \sinh(ky) - B_0 \sin(k\rho/2) \cos(kz - k\rho/2) \cosh(kz) \quad (2)$$

ここで $\rho$ は上下磁石列間の位相(ラジアン)である。アンジュレータの磁場中心近傍磁場の展開近似と半周期毎に発生する力を適当に平均化することで次式が得られる。

$$\frac{dv_y}{dt} \approx -\frac{1}{2} \left( \frac{eB_0}{my} \right)^2 [\cos^2(k\rho/2) + \sin^2(k\rho/2)] y = -\frac{1}{2} \left( \frac{eB_0}{my} \right)^2 y \quad (3)$$

これは単純な単振動でありアンジュレータのスライド量に依存しない収束力が存在することが特徴である。これより cERL-FEL でのパラメータを用いて、電子のアンジュレー

タ内部の垂直軌道を求めると、

$$y(t) = y_0 \cos(k_0 z) + 0.135 \theta_{y0} \sin(k_0 z) \quad (4)$$

$$k_0 \approx \frac{2\pi}{\lambda_u} \cdot \frac{A_w}{\gamma} \approx 7.64 \quad (5)$$

またこの垂直振動の周期は、

$$L = \frac{2\pi c}{\omega_0} = \frac{\lambda_u \gamma}{A_w} \approx 0.82 \text{ m} \quad (6)$$

以上の解析結果により求めた垂直電子軌道の比較を Fig. 2 に示す。アンジュレータの入射条件として 1 mm 高い平行ビーム(赤線)と 1 mrad 傾いたビーム(青線)を比較している。

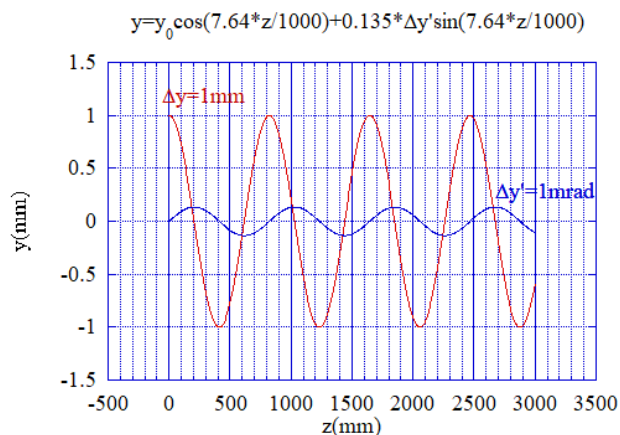


Figure 2: Analytical vertical orbit during undulator.

次に、上の解析結果を検証するために、(1)の磁場分布中での垂直電子軌道を 4 次のルンゲクッタ法で数値計算を行った。その結果を Fig. 3 に示す。

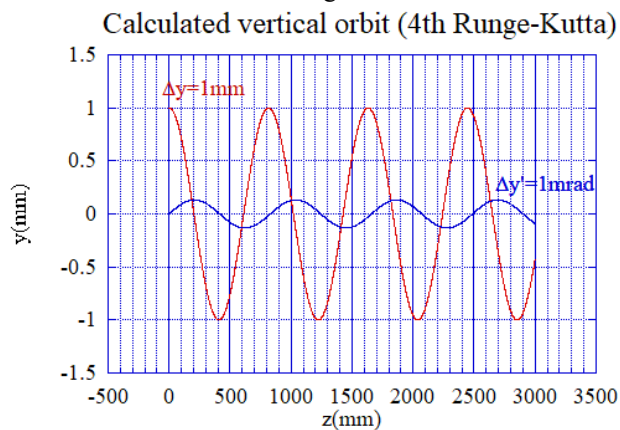


Figure 3: Calculated vertical orbit during undulator.

上の数値計算結果は、(4) (5) (6)式で表した解析結果 (Fig. 2)と非常によく一致しており、確かに 17.5 MeV の電

子ビームに対してアンジュレータ中で強い垂直収束力が働いて、電子ビームがアンジュレータ磁場中心軸に拘束されていることが判明した。この収束力は波長を変えるためにアンジュレータのスライド量を変えても変化しない。このためにアンジュレータ本体部に設置された垂直方向補正コイルの効果が磁石列位相に関わらず現れないという観測結果も理解された。しかしこの収束力は(3)式より、ビームエネルギーが上がると急速に弱くなるために、cERL のような低エネルギーマシン特有の現象といえる。

### 3. アンジュレータのテーパー化

6 月の cERL のビーム運転では、予想外に FEL 出力が大きくならなかった。これは cERL アーク部でのビーム輸送中に空間電荷効果のため電子バンチにエネルギーチャープが生じてエネルギー拡がりが大きくなったためと考えられた。これを補償するためにアンジュレータのテーパー化の検討を cERL の各グループで開始した。我々は、テーパー量としてアンジュレータ上流端と下流端で 5% 程度の磁場強度変化を与えることを検討した。cERL-FEL 用のアンジュレータには磁石列をテーパー化する事を想定していなかったため、磁石列を傾ける機構を有していない。しかし検討の結果、上側磁石列支持部にシムを挿入することで必要な傾斜角 0.12 mrad を実現することが判った。そこで 11 月の cERL 停止期間中にシムによるテーパー化作業を実施した。その様子を Fig. 4 に示す。シム挿入の結果、実際の上側磁石列の傾斜量は、レーザートラッカー(Leica AT402)で計測し確認を行った。



Figure 4: Tilting of the magnetic array using shim plates.

シムの挿入によって要求される 0.12 mrad の傾斜を上側磁石列に与えることはできたが、これによってアンジュレータの磁場中心軸もリング平面より上に 0.06 mrad 傾くこととなった。このテーパードアンジュレータの内部で垂直電子軌道を検討した結果を Fig. 5 に示す。入射ビーム条件は Fig. 2, 3 と同じである。

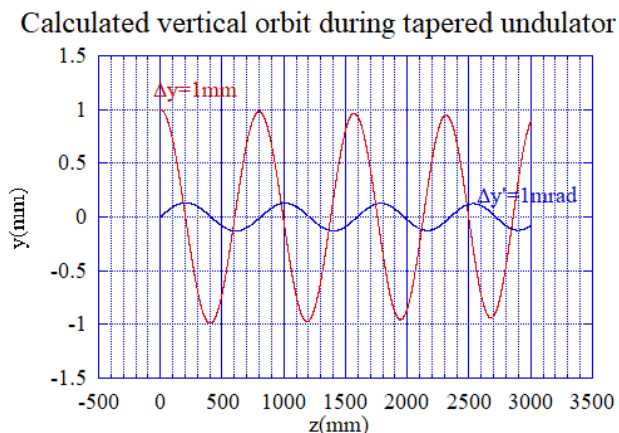


Figure 5: Calculated orbit during tapered undulator.

垂直振動の振幅は少しずつ減衰し、周期も少しずつ狭まるが、アンジュレータ軸の傾き (0.06 mrad) の影響も無視できると考えられる。軌道の状態はテーパーのない場合とほぼ同じであり、電子ビームはテーパー化されたアンジュレータの中心軸に強く拘束される。このとき入射する電子の角度の影響は位置誤差に対して十分小さいため FEL 運転にあたってはビームの垂直方向の位置を重視してビーム調整を行う方針を固めた。

2021 年春の運転では実際にテーパードアンジュレータとしての FEL 運転を行った。磁石列の位相に関わらずテーパーなしの状態と同様に安定した運転ができた。FEL 出力も、まだ十分とは言えないがはっきりとした増大も見られている。

## 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] K. Tsuchiya *et al.*, PASJ2020, FRPP59 (2020).
- [3] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, 391 (1991).
- [4] K. Tsuchiya *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86, 043305 (2015).