

cERL 自由電子レーザー用アンジュレータの開発

DEVELOPMENT OF THE TANDEM UNDULATORS FOR THE cERL-FEL

土屋公央^{#,A)}, 阿達正浩^{A)}, 塩屋達郎^{A)}, 江口柊^{A)}, 加藤龍好^{A)}

Kimichika Tsuchiya^{#,A)}, Masahiro Adachi^{A)}, Tatsuro Shioya^{A)}, Shu Eguchi^{A)}, Ryukou Kato^{A)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

Abstract

At the KEK compact Energy Recovery Linac (cERL), we are constructing two undulators as a light source for the cERL-FEL project. The period length of undulators are 24 mm and the periodicity number is 124. The target wave length region of cERL-FEL undulator is from 10 μm to 20 μm . We designed cERL-FEL undulators as adjustable phase undulator (APU) with fixed gap of 10mm. We describe the design 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計画されている。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 μm)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予定である。このアンジュレータは、最小ギャップが 10 mm と狭いもののアウトバキューム型を採用している。また波長変更のためには、通常行われる磁石列間のギャップ調整ではなく、上側磁石列を長手方向にスライドさせている adjustable phase undulator (APU)[1]として使用する。これらの方式を採用したのは計画全体でのコストを抑制しつつ、自由電子レーザーの発振を目指すためである。このアンジュレータの開発に当たって重要な課題のひとつにアンジュレータ内部の電子ビームの輸送が挙げられる。cERL の電子ビームエネルギーは 17.5 MeV と低いために、アンジュレータの各極で生じる積分磁場の微小な誤差が積み重なることで電子軌道を大きく曲げてしまう。これは真空チャンバーの内径が 8 mm と狭い垂直方向に関しては重要な問題となる。本稿では cERL 自由電子レーザー用アンジュレータの開発の現状とその磁場調整方法の検討について報告する。

2. cERL-FEL 用アンジュレータの設計

cERL-FEL プロジェクトでは長さ 3 m のアンジュレータを 2 台タンデムにして用いる。そのパラメータは電子ビームエネルギーが 17.5 MeV である cERL の電子ビームを使った SASE-FEL の発振条件から決められ、周期長 24 mm、周期数は 124 である。また磁石列間の Gap は 10 mm 固定であり、上側の磁石列をビーム進行方向にスライドして光子エネルギーを変更する APU である。この U#19 の基本的なパラメータを Table 1 にまとめる。

Table 1: Basic Parameters of the cERL-FEL Undulator

周期長	24 mm	形式	Halbach-type
周期数	124	磁石素材	Nd-Fe-B
最大磁場	$B_y = 0.63$ T	位相駆動範囲	± 12 mm
Gap	10 mm(固定)	波長範囲	10-20 μm

本アンジュレータの周期長は 24 mm 短いため、真空封止型の採用が一般的である。しかし本プロジェクトでは予算的制約が大きいため、GAP 固定型を採用した。また磁石ホルダーも 3 m の長いアルミビーム上に全ての磁石を組み付ける。この磁石列の平行度・真直度の調整のためには SPring-8 の真空封止型アンジュレータで開発された差動アジャスターを採用している。これにより磁石表面の位置を測りながら磁石列の精密な位置調整を行う。電子ビームの輸送のためには、アンジュレータ両端部電磁石以外に、アンジュレータ磁石列に沿って DC 磁場補正用コイルを 1 台あたり水平・垂直の 2 組を設置する。(Fig. 1)

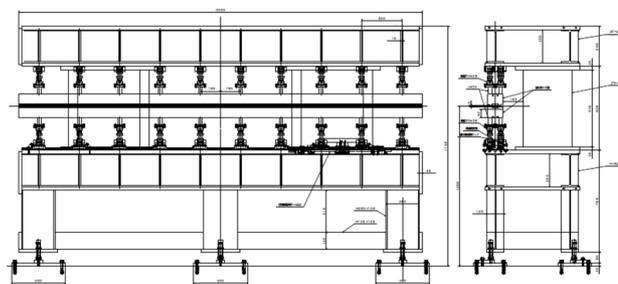


Figure 1: Concept design of the cERL-FEL undulator.

一方、10 mm の固定 GAP アンジュレータを採用したために、磁場調整時に磁石の入れ替え調整ができない問題点がある。また垂直方向に狭い断面形状を持った真空ダクトの開発が必要である。

3. 誤差磁場の検討

エネルギー 17.5 MeV の電子ビームを全長 3 m のアンジュレータ内部を輸送することは本計画の実現のために重要な課題である。アンジュレータの各極で微小な誤差

[#]kimichika.tsuchiya@kek.jp

磁場が存在すると、積み重なった場合に電子軌道を大きく曲げてしまう。アンジュレータが標準的な光源として導入されている数 GeV 級の放射光施設では全く問題にならない程度の誤差磁場が cERL-FEL では注意すべき問題になると考えられる。特に真空チャンバーの内径が 8 mm と狭い垂直方向に関しては重要な問題となる。

これまで PF ではアンジュレータの磁場調整に際して、半周期毎の積分磁場を調整の指標に採用してきた。この調整例を Fig. 2 に示す。調整前後で各極の積分磁場の誤差を 0.2% 程度まで抑えることが出来ている。近年は、個別磁石の磁場分布を予め測定し最適化することで磁石列の初期配列を最適化する重ね合わせ法で、初期状態で偏差 0.2% を達成している[2, 3]。

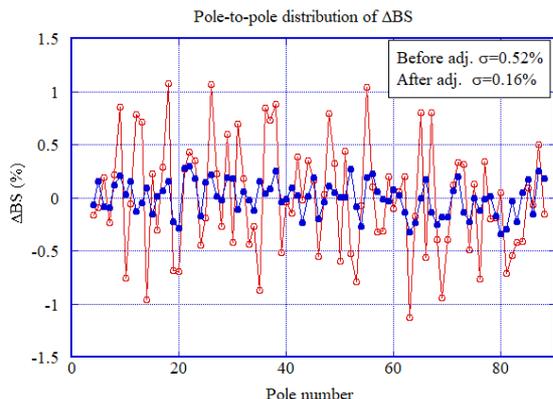


Figure 2: Distribution of the first integrals at individual magnetic poles.

cERL-FEL 用アンジュレータでは Gap が 10 mm で固定されているため磁石の入れ替え調整が困難なため、この重ね合わせ法によって初期配列を決める予定である。このとき必要となる各極の積分磁場の誤差の程度を見積もるためにアンジュレータ内での軌道シミュレーションを行った。まず今回の磁場強度から半周期あたりの積分磁場を 5000 Gauss·cm と想定し、従来の実績値から 0.2% に相当する標準偏差 (BS_σ=10 Gauss·cm) の誤差磁場を各極にランダムに与えて軌道計算を行った。この結果を Fig. 3 に示す。ここでは垂直磁場に誤差があるとして水平方向の軌道を示しているが、各極の水平磁場に誤差がある場合でも全く同様である。従来最適化では十分なビーム輸送は望めない可能性が強い。

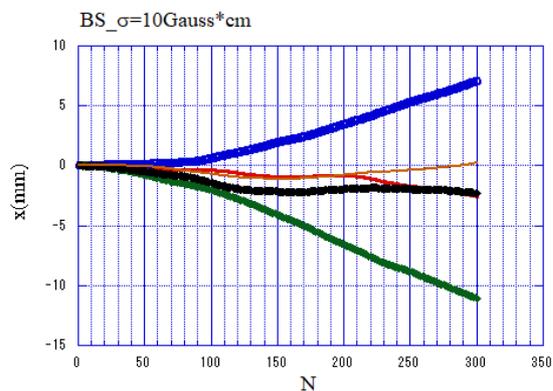


Figure 3: Simulation result of the orbit through the undulator (I).

次に最適化の指標として使う積分磁場を半周期毎から一周期毎の分散へ変更して同じ計算を行った (Fig. 4)。

ここでは軌道のドリフトは小さく抑えられてアンジュレータ内でのビーム輸送の可能性が増えているのが判る。この場合、アンジュレータスペクトルの位相エラーは悪化するはずであるが軌道としてはより直線性が増すため、実際の cERL-FEL 用アンジュレータの初期配列決めには好ましいため、この方法で最適化を行う予定である。

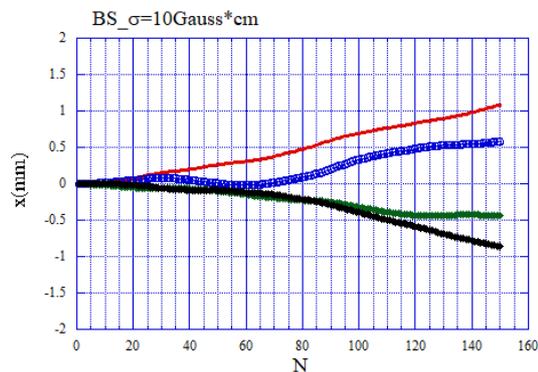


Figure 4: Simulation result of the orbit through the undulator (II).

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