

PF リングにおける可変偏光アンジュレータ:U#19 の建設

CONSTRUCTION OF A NEW ELLIPTICALLY POLARIZING UNDULATOR(U#19) AT THE PHOTON FACTORY

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 Photon Factory, we are constructing a new elliptically polarizing undulator(U#19) as a light source for soft X-ray scattering, spectroscopy and STXM experiments. U#19 is an EPU with an APPLE-II-type magnetic arrangement to obtain various polarization states. We designed U#19 to utilize the extended straight section as much as possible. The target photon energy region of U#19 is from 100 eV to 2 keV under various polarization states. The installation of U#19 in the PF ring will be performed during the summer shutdown of the PF ring in 2018. We describe the details of the construction of U#19 in this report.

1. はじめに

PFリングでは、直線部増強の改造により挿入光源のための直線部長が延長された[1]。これらの直線部で使用されていた挿入光源は、ここ 10 年の間に真空紫外から軟 X 線のアンジュレータとして順次更新されている。これらは全て可変偏光アンジュレータ(EPU)であり、これまでに U#16-1、U#16-2、U#02-2、U#13、U#28 が建設されており、順調にユーザー運転が行われている[2]。今回建設中の EPU である U#19 は、従来の BL19 ユリボルバー型アンジュレータから、様々な偏光状態をもった軟 X 線の散乱・分光実験や STXM 実験に使用される可変偏光アンジュレータ:U#19 として生まれ変わる。U#19 は APPLE-II 型の EPU[3]であり、放射光のエネルギー範囲は 100eV から 2keV である。このエネルギー域を様々な偏光状態を持った光を発生する。PF リングのすべての APPLE-II 型 EPU の特徴は、4 列の磁石列を全て独立に動く構造を持つことである。これにより Gap 間隔の変更による光子エネルギー調整以外に、Gap を固定したまま上下または左右の磁石列をビーム進行方向にスライドさせて光子エネルギーを調整する、adjustable phase undulators (APU)として利用できる特徴を持っている[4,5,6,7]。APU 方式では制御方式が簡単になるため、PF では全ての APPLE-II 型 EPU の制御方法として APU 方式を採用しており、U#19 も同様の運転を行う予定である。

U#19 の本体は既に完成し、2018 年夏の PF リングインストールへ向けて磁場調整中である。本稿では U#19 の設計と建設状況について報告する。

2. U#19 の設計

U#19 は延長された直線部の長さを最大限に利用して全長 3.7mと PF リングで最も長いアンジュレータになる。その周期長は 68mm、周期数は 55 である。U#19 は APPLE-II 型の磁石列配置を持ち、そのターゲット光子

[#]kimichika.tsuchiya@kek.jp

エネルギー域は 100eV から 2keV 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 U#19

周期長	68mm	EPU 形式	APPLE-II
周期数	55	磁石素材	Nd-Fe-B
最大磁場	$B_y=0.71T$	Gap 駆動範囲	24-150mm
	$B_x=0.46T$	磁石サイズ	40*40*17mm
エネルギー範囲	100-2000eV	磁石列間隔	1.6mm

このパラメータによる U#19 の放射光特性として、楕円偏光モードでの計算スペクトルを Fig. 1 に載せる。実線は Gap を変えた際の各次数ピーク位置の包絡線を示している。

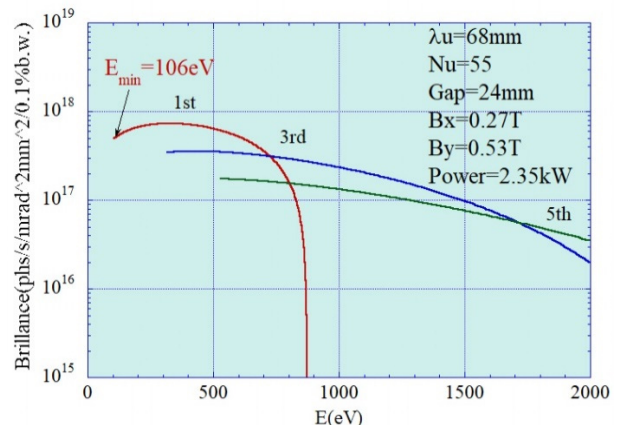


Figure 1: Calculated spectrum of U#19.

U#19 の架台の構造に関する基本設計は、前回建設した U#13 と同じである。しかし U#19 はその全長、最大磁場ともに PF リングの EPU の中で最大となるために、磁石列間に働く磁石吸引・反発力は U#13 に比べて 1.5 倍

になる。このため磁石列を支持する構造体は強度計算を繰り返し、その耐荷重性能の強化を図っている。Fig. 2 に KEK に搬入されて磁場調整中の U#19 の写真を示す。



Figure 2: Photograph of U#19.

3. U#19 の磁場調整と磁場測定

3.1 磁石の初期配列

U#19 の建設にあたっては、使用する全ての磁石の電子進行方向の磁場分布を予め測定を行い、このデータを使用して良好な磁石の初期配列を決めている。この磁場の重ね合わせによる磁石初期配列の決定法は、これまでの PF での EPU 開発で発展させてきた手法である [8]。U#19 の建設に当たっては水平偏光モードと垂直偏光モードの磁場分布を同時に最適化する試みを新たに行った。Fig. 3 に個別磁石の磁場測定のセットアップを示す。

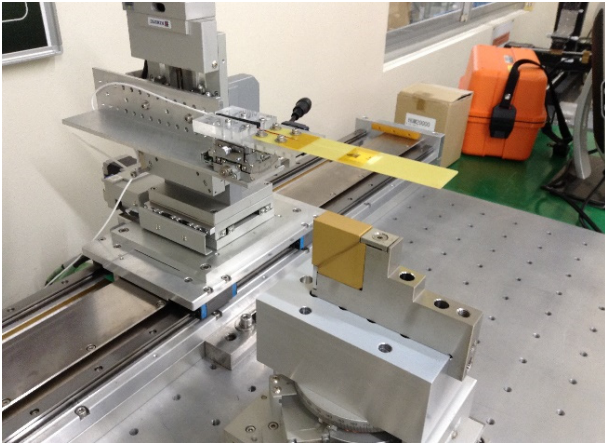


Figure 3: Measurement setup for individual magnetic blocks along the beam axis using two-dimensional Hall probes system. The height of the probes above the magnet surface is 12 mm, corresponding to a minimum gap of 24 mm.

測定には高精度な位置分解能を持ったステージに乗せた 2 次元 Hall 素子を用いて、水平と垂直方向の磁場分布を同時に測定する。測定軸は最小 Gap(24mm)での

電子進行軸(z軸)に一致させている。測定は厚さ 17mm の磁石中心から±200mm の範囲で行い、測定データは 0.1mm ステップで記録される。大きくこの個別磁石測定の総数は予備の磁石も含めて 920 である。これらの測定磁場データを重ね合わせることでアンジュレータ磁場をシミュレートして、良好なアンジュレータ磁場を得るための最適化を行った。最適化の手法としてはアニーリング法を用いている。まず初めに、ある 1 組の磁石列配置に対して、磁石列間の位相を調整することで得られる水平偏光モードと垂直偏光モードの磁場分布を考える。この 2 組の磁場分布に対して式(1)で示す半周期毎の積分磁場 (BS_y , BS_x) を計算する。この計算のためには、個々の磁石の磁場データから半周期区間に分けた積分磁場データを予め計算しておき、各々の磁石の寄与を足し合わせていくことで計算時間の短縮化を図っている。

これを用いて式(2)で表す半周期毎の積分磁場の分散を最小化するようにアニーリングする。

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

$$S = \sum_{j=1}^{2N} \left\{ (BS_{x_j})^2 + (BS_{y_j})^2 \right\} \quad (2)$$

これにより水平偏光モードと垂直偏光モードのどちらでも良い磁場分布を得るような磁石配列の組み合わせを探索した。このシミュレーション結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4 は水平偏光モードで Fig. 5 は垂直偏光モードの場合である。どちらも半周期毎の積分値の偏差(%)の分布を示している。ここで赤丸はランダムな磁石配列に対するものであり、青丸はアニーリング後の結果である。

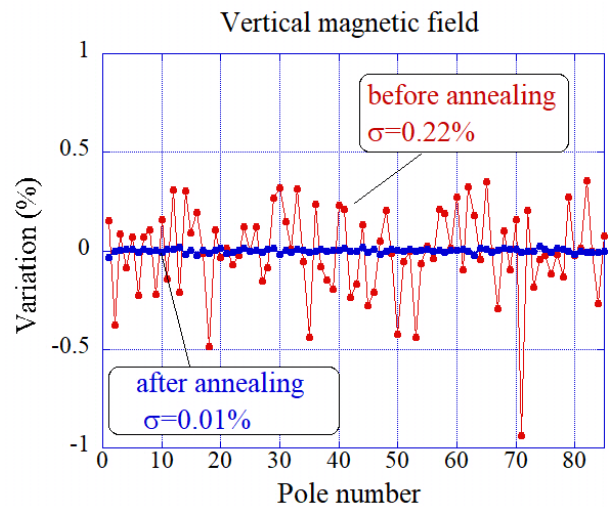


Figure 4: Vertical field in the horizontally linear polarizing mode. Distribution of the first integrals of the magnetic field every half period along the z-axis at individual magnetic poles compared before and after the sorting simulation.

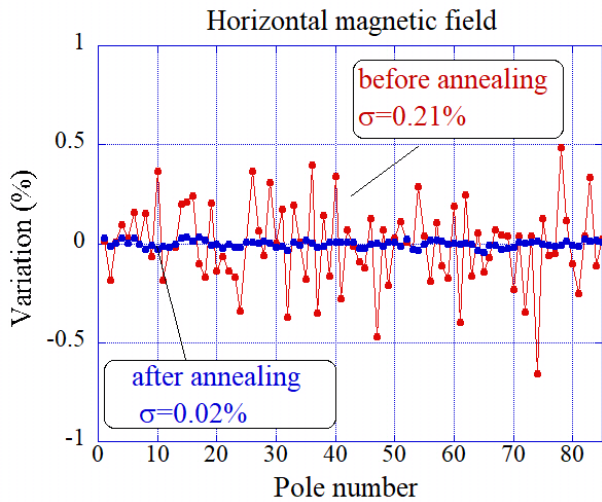


Figure 5: Horizontal field in the vertically linear polarizing mode.

3.2 U#19 の磁場測定

上述の初期配列に従い磁石を組み込んだ後、U#19 は KEK に搬入され、磁場調整と磁場測定が開始された。z軸方向の磁場分布測定には 2 次元 Hall 素子システムを用いる。またムービングワイヤーシステムを使って積分磁場の測定を行う。この U#19 の磁場測定の様子を Fig. 6 に示す。

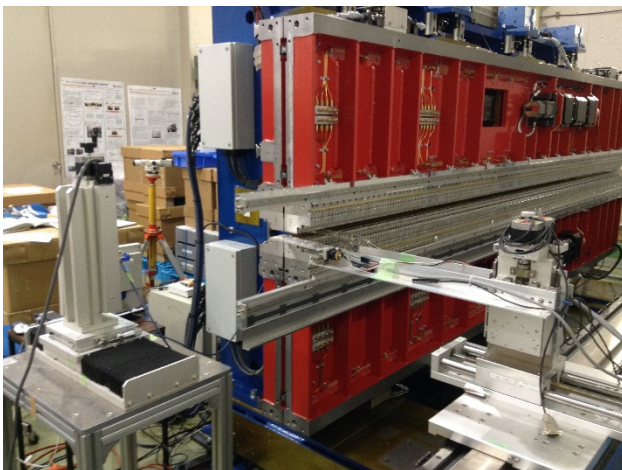


Figure 6: Photograph of U#19 during the magnetic field measurement.

我々は前章で決めた初期配列の有効性を調べるために、この初期状態での水平偏光モードと垂直偏光モードでの磁場分布を解析した。測定は最小ギャップの 24mm で行った。この時の半周期毎の積分磁場の偏差を Fig. 7 に示す。赤丸が水平偏光モードを、青丸が垂直偏光モードの結果を表している。また比較のために、U#16-1 の水平偏光モードの初期状態を黒丸で示している。U#16-1 は初期配列決定のための本手法を使っていない EPU である。これに対して U#19 の初期状態の結果は両モードとも大幅に改善していることが判る。PF での EPU の半周期毎の積分磁場偏差の調整目標は標準偏差で 0.2% で

ある。U#19 では初期配列状態でこれを満たしている。またアンジュレータスペクトルに影響を与える位相エラーは両モードとも 3 度であった。これは PF-BL19 の要請するスペクトル性能を十分に満たすものであり、これ以上の大きな磁場調整は要さず、U#19 での磁石初期配列決めは有効に働いたと考えている。

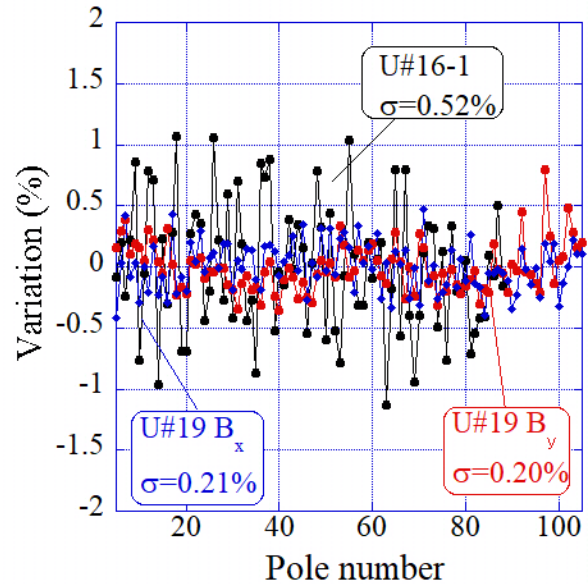


Figure 7: Measured distribution of the first integrals of the magnetic field every half period along the z-axis at the individual magnetic poles. The variation from the average value is expressed. The red points are the case of the horizontally linear polarized mode and the blue points are the case of the vertically linear polarized mode.

U#19 の PF リングへのインストールは、本夏のリングシャットダウン期間中に予定されている。それまでの間に、積分磁場の多極成分エラーの補正を行うとともに、各偏光モードでの磁場分布測定を続けていく。インストール後の PF リング秋季運転では U#19 のユーザー運転に向けた立ち上げスタディを積む予定である。

参考文献

- [1] T. Honda *et al.*, AIP Conf. Proc. 879, 87-90 (2007).
- [2] K. Tsuchiya *et al.*, AIP Conf. Proc. 1741, 020023 (2016).
- [3] S. Sasaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A331, 763-767 (1993).
- [4] R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A306, 391 (1991).
- [5] S. Lidia, R. Carr, Nucl. Instr. and Meth. A 347, 77-82 (1994).
- [6] T. Schmidt *et al.*, AIP Conf. Proc. 879, 404-407 (2007).
- [7] T. Schmidt *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 425 032020 (2013).
- [8] K. Tsuchiya *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86, 043305 (2015).