

DEVELOPMENT OF A POLARIZATION-SWITCHING SOURCE AT THE PHOTON FACTORY, KEK

Shigeru Yamamoto^{1,A, B, C)}, Kimichika Tsuchiya^{A)}, Hiroyuki Sasaki^{A)}, Tatsuro Shioya^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Tohru Honda^{A)}, Yasunori Tanimoto^{A)}

^{A)} Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{B)} Department of Materials Structure Science, The Graduate University for Advanced Studies

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{C)} Department of Photoscience, The Graduate University for Advanced Studies

Shonan Village, Hayama, Kanagawa 240-0193

Abstract

An APPLE (Advanced Planar Polarized Light Emitter)-II type polarizing undulator, U#16-1 has been constructed and installed in the 2.5GeV PF (Photon Factory) storage ring, which has been upgraded to enhance the straight sections for insertion devices. U#16-1 and a forthcoming identical undulator comprise a polarization-switching source with a fast kicker system. U#16-1 is designed to be a soft x-ray source at the energy region from 200eV to 1keV. Details of the construction of U#16-1 and its commissioning in the PF ring are reported below.

KEK-PFにおける高速偏光切り替え光源の開発

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構・放射光研究施設 (KEK-PF) では、これまで2.5GeV電子蓄積リングの直線部改造を行ってきた[1]。この改造の目的は、1997年に行った高輝度化改造で達成した低エミッタンスを保ちつつ、光軸不変のまま、直線部の新設および既存直線部の拡張を行うことである。例えば、鉛直方向について0.5m以下の β 関数を実現可能な1.4m直線部が4本新設される一方で、B01-02間、およびB15-16間の5.0m直線部が8.9mに伸長された。今後は、これらの直線部に新しい特徴ある挿入光源を配備することが課題となる[2]。

この方向で、我々はB15-16間直線部に設置する高速スイッチング可変偏光アンジュレータ光源の開発を行ってきた。この光源は当初、200-1000eVのエネルギー領域において、10Hz程度の高い周波数で左円偏光/右円偏光 (円偏光度90%程度) を切り替えることのできる光源として要求された。その後の検討において、円偏光の切り替えのみでなく、直線偏光の切り替え (鉛直/水平または $\pm 45^\circ$) の重要性が強調されたため、アンジュレータ磁気回路としてはこれらの偏光状態も達成可能なAPPLE (Advanced Planar Polarized Light Emitter)-II型[3]を採用した。2006-2007年度においては、光源を構成する2台のアンジュレータのうち1台目 (U#16-1) の建設を行い、併せて高速偏光切り替えを可能にするキッカーシステムおよび真空システムの整備を行った。これらの加速器要素を2007年度末にPFリングに導入設置した。

ここではU#16-1の開発の詳細とPF設置後の立上げ調整、および高速キッカーシステムを含めたB15-B16直線部の構成について報告する。

2. PFにおけるB15-B16直線部の構成

放射光ユーザーの立場からは、円偏光放射光源といえ、近年では“高速”の偏光切り替えが可能な光源を意味するのが常識になりつつある。

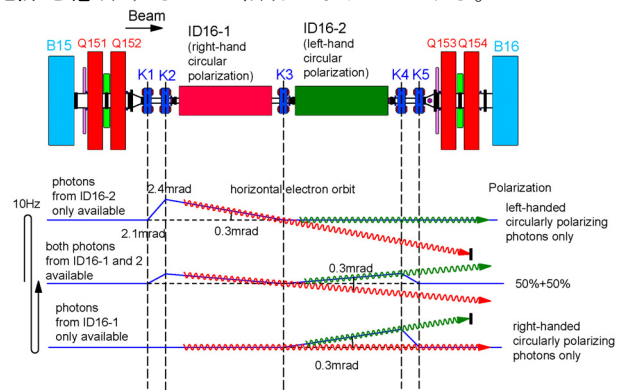


図1. PF-2.5GeVリングB15-B16直線部における光源要素の配置と、左右円偏光の切り替えの方式。

今回の光源開発では、PF-2.5GeVリングの B15-B16間直線部に2台の同一の偏光切り替えアンジュレータを縦列に配置し、各々を異なる偏光状態に設定した上で、5台の高速キッカー電磁石を用いることで、偏光を高速に切り替えて使用する方式を採

¹ E-mail: shigeru.yamamoto@kek.jp

用した。このキッカー電磁石は、積層珪素鋼板（厚さ0.5mm）より構成され、 $\pm 50V \times 100A$ の容量を持つバイポーラ電源により駆動される。この電源の周波数帯域は10-45Hzであり目標とする10Hzでの偏光切り替えを可能にする。図1に、B15-B16直線部に設置する光源要素の配置と、左右円偏光の切り替えの方式を模式的に示した。

3. 可変偏光アンジュレータU#16-1の開発

U#16-1は、PF-2.5GeVリングにおいて基本波によって概ね200-1000eVをカバーするために56mmの磁場周期長を採用し、周期数を44とした。

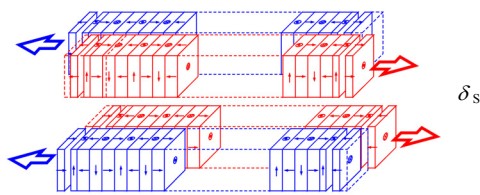


図2a. U#16-1の対称モード。

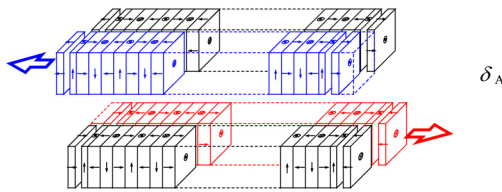


図2b. U#16-1の反対称モード。

このアンジュレータは磁気回路としてAPPLE-II型を採用しているため、4列ある磁石列の配置の対称性に基づいて2つの主要な動作モードを持つ：(a) 対称モードと(b) 反対称モード（図2参照）。対称モードでは、斜め上下の磁石列を対にして、1対を上流側に他方を下流側に軸方向に変位させる（位相差 δ_s ）ことにより、水平直線偏光から円偏光を経て鉛直直線偏光までの多様な偏光状態を実現できる。一方、反対称モードでは、1対の斜め上下磁石列を固定し、他方の上方列を上流に下方列を下流に変位させる（位相差 δ_A ）ことにより、直線偏光のまま偏光面を水平から鉛直まで回転させることが可能である。図3にはU#16-1の放射の計算スペクトルを示した：(a)対称モード（完全円偏光時と楕円偏光時）と(b) 反対称モード（対称モードにおける直線偏光時を含む）。

4. 磁場測定および調整

この磁石列に対する磁場調整を精密磁場測定に基づいて行った（図4参照）。この目的でホール素子を用いた精密磁場センサを製作した。このセンサは、鉛直・水平方向の磁場を同時に測定でき、10mmまでの狭い磁石ギャップに挿入可能である。さらに、ホール出力への温度効果（温度係数 = $-0.1\%/K$ ）を抑えるため、測定を行う室温領域において $0.01^\circ C$ の精度で素子の温度を制御できる[4]。

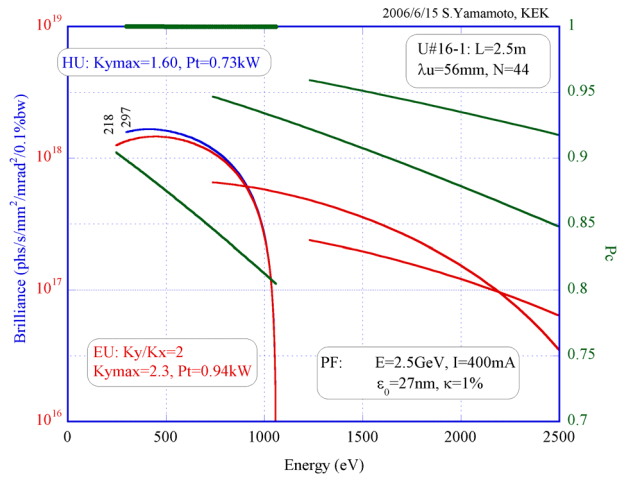


図3a. U#16-1のスペクトル：対称モード。

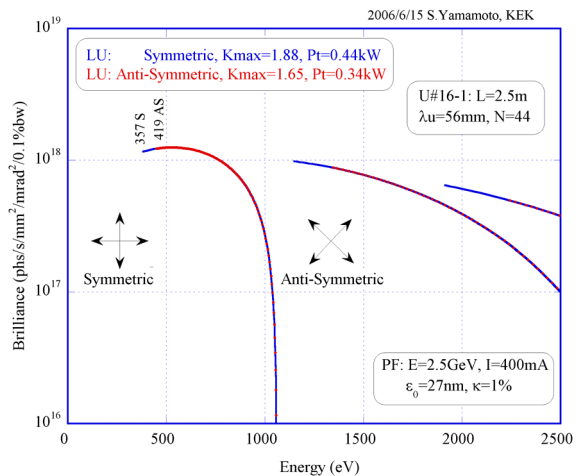


図3b. U#16-1のスペクトル：反対称モード。

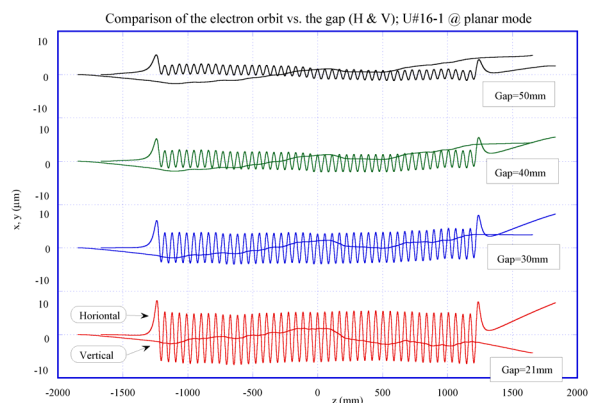


図4. U#16-1の磁場調整の結果のまとめ。鉛直 (y) および水平 (x) 方向の電子軌道として表した。

磁場調整は、U#16-1の4列の磁石列が全て揃った通常型アンジュレータの磁石配列（対称モード、反対称モードともに位相差 = 0の状態）に対して行った。この時、アンジュレータ各極における電子軌道の蹴り角を調整し、最終的にはほぼ理想的に近い正弦波形の電子軌道が得られるようにした。アンジュ

レータ中の電子軌道は、図4に示したように非常に良好である。磁場調整は最小ギャップ21mmにおいて行ったが、磁場の精度はギャップの可動範囲において保たれている。最終的にアンジュレータ中の磁場の位相誤差（標準偏差）で表して ± 2 度という高い磁場精度を得ることができた。

図4は、さらに、アンジュレータ出入り口における蹴り角に関して非常に満足すべき結果が得られたことを示している。図4から、これらの蹴り角が絶対値も小さく、ギャップに伴うそれらの相対的変化も非常に小さいことが判る。

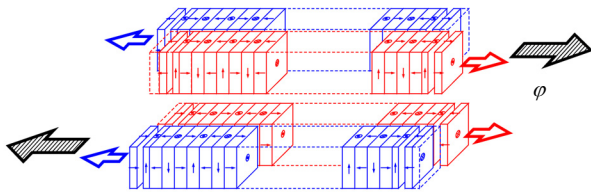


図5a. U#16-1対称モードにおける位相差 ϕ の付加。

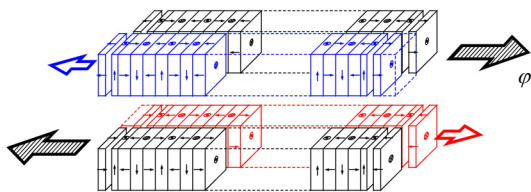


図5b. U#16-1反対称モードにおける位相差 ϕ の付加。

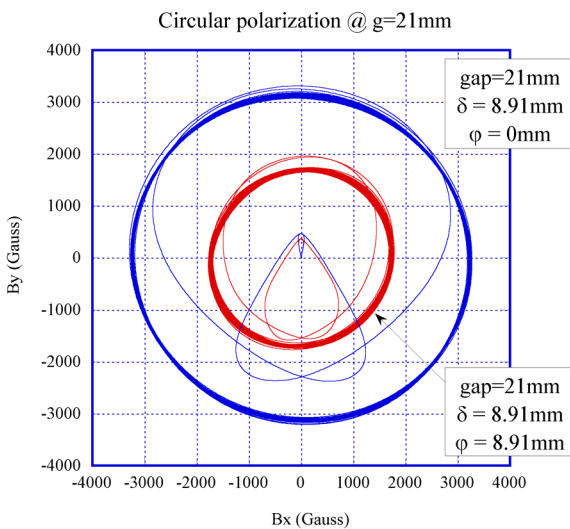


図6. 対称モード・完全円偏光状態における磁場強度変更の例

U#16-1を用いるときには、ギャップを制御しつつ δ_s （対称モード）または δ_A （反対称モード）を調整することにより、任意の磁場強度と偏光状態を選択する。対称モードにおいて実用上重要になる、完全円偏光状態（鉛直磁場/水平磁場=1）と楕円偏光状態（鉛直磁場/水平磁場=2）に対して、全てのギャップでこれらの状態を達成する δ_s の値を確定してある。また、反対称モードにおいて全ギャップ

に対して $\pm 45^\circ$ の偏光面を保つことのできる δ_A の値についても同様の準備を行った。

一方で、対称モードにおいて δ_s 一定のまま、下側2列の磁石列に対して上側2列の磁石列に付加的な位相差 ϕ を設けると（図5a参照）、ギャップ固定のまま偏光状態不変のまま磁場の強度を変更することができる[5]。さらに、反対称モードでは $\delta_A = \delta_C$ （ここで δ_C は対称モードにおいて完全円偏光状態を作る δ_s の値）に設定した上で、上記の位相差 ϕ を付加すると（図5b）、同じくギャップ固定のまま磁場強度不変のまま偏光面を回転することが可能になる。

対称モード・完全円偏光状態における磁場強度変更の例を図6に示した（ギャップ=21mmに固定）これらは、U#16-1の運転方法を単純化する上で実用上非常に重要である。

5. PFリングへの設置・立上げ運転

磁場調整後のU#16-1に真空槽を装着し、2007年度末高速キッカーシステムとともにPFリングに導入・設置した。この真空槽（長さ2.85m）の排気には、スパッターイオンポンプ（排気速度185liter/s）および非蒸発ゲッターポンプ（1500liter/s）を使用した。B15-B16直線部全体の長さは約8.9mである一方、U#16-1用真空槽を含むこの直線部の鉛直方向の開口は15mmと狭い。この場合、B15-B16直線部全体の真空路を全てステンレス鋼で製作すると、抵抗壁による横方向ビーム不安定が惹き起こされる可能性が高い[6]。この問題を予防するために、U#16-1用真空槽（ステンレス鋼製）の電子ビームを挟む上下面に厚さ100 μ mの銅鍍金を施した。

リングへの設置後、光導入を経てビームラインの立上げ、およびU#16-1本体と高速キッカーシステムの立上げを遂行している。U#16-1の主要な運転モード（水平直線偏光モードおよび \pm 円偏光モード等）において、アンジュレータの独立チューニングが可能になり、すでに予備的な実験も開始されている。

高速キッカーシステムの立上げでは、周波数10Hzにおける設計バンプ軌道の達成に成功した（図1参照）。現在バンプの許容値（ビームサイズの1/10）と同程度（水平方向）から数倍（鉛直方向）のバンプの漏れが見られる。直線部にすでに独立に設置してある高速ステアリングを用いてこれらを抑制することが今後の課題となる。

参考文献

- [1] T. Honda, et al., AIP Conf. Proc. **879**, 87-90 (2007).
- [2] 例えば, S. Yamamoto, K. Tsuchiya and T. Shioya, AIP Conf. Proc. **879**, 384-387 (2007).
- [3] S. Sasaki, Nucl. Instr. And Meth. **A 347**, 83-86 (1994).
- [4] S. Yamamoto et al., Rev. Sci. Instrum. **66(2)**, 1996-1998 (1995).
- [5] T. Schmidt and D. Zimoch, AIP Conf. Proc. **879**, 404-407 (2007).
- [6] N.Nakamura, private communication.