

DEVELOPMENT OF THE SHORT-PERIOD AND SHORT-GAP UNDULATORS FOR THE 2.5GEV PHOTON FACTORY STORAGE RING

Shigeru Yamamoto^{A, B, C)}, Kimichika Tsuchiya^{A)}, Hiroyuki Sasaki^{A)}, and Tatsuro Shioya^{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

A very short-period and in-vacuum type undulator, SGU#17 has been constructed and installed in the 2.5GeV Photon Factory storage ring, which has been upgraded to enhance the straight sections for insertion devices in the PF ring. SGU#17 is designed to be a hard x-ray source for protein crystallography and structural biology.

PHOTON FACTORY 2.5GeV リングのための短周期アンジュレータの開発

1. PF直線部改造と短周期アンジュレータ

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。また、B01-02間、およびB15-16間の5.0m直線部が9.2mに伸長される。これらの1.4m短直線部は、そこに短周期のアンジュレータ (Short Gap Undulator: SGU) を設置し、X線領域のアンジュレータ光をPF2.5GeVリングにおいて利用可能にできるという点で、非常に重要である。

用いても、図1に示したように10mm程度の非常に短い周期長のアンジュレータを使用すれば、アンジュレータの低次高調波によって15keV程度の硬X線領域のアンジュレータ放射を得ることは可能である。しかし、この状況を実現するには十分に強いアンジュレータ磁場を実現するために、アンジュレータの磁石間ギャップを5mm程度以下の非常に狭い値に設定することが必要になる。このことは、最近KEK-PFやその他の第三世代放射光施設において多用されるようになった、真空封止型アンジュレータの技術[2]と最新の加速器ラティス設計法との組み合わせによって初めて可能となる[3]。図2は、1.4m短直線部の新設 (図2a.および2b.) とそこにおける光学関数 (図2c.) を図解している。

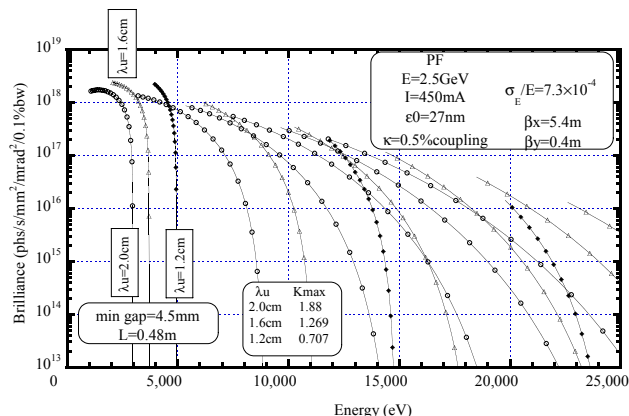


図1. PFリングに新設された1.4m直線部に設置可能な短周期アンジュレータの予測されるスペクトル。周期長12mm, 16mmおよび20mmについて、低次高調波のピーク位置の軌跡を示している。

2.5GeVという比較的低い電子ビームエネルギーを

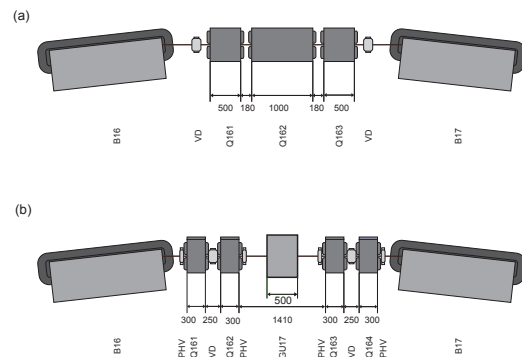


図2a.および2b. 1.4m直線部の新設。

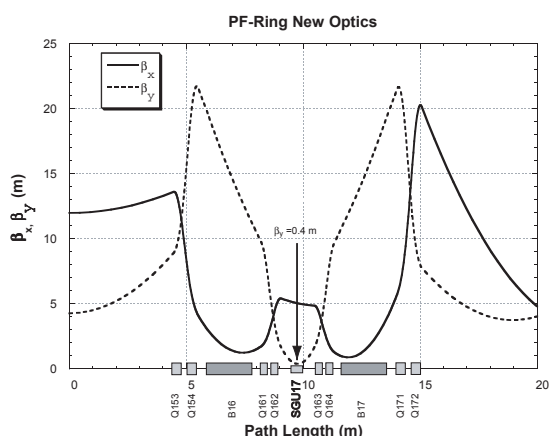


図2c. PFリングに新設された1.4m直線部における光学関数。鉛直方向 β 関数の設計値は0.4mである。

2. 短周期アンジュレータの開発

2005年夏に完了したPFの直線部改造によって偏向電磁石B16-17間（この他、B02-03間、B14-15間、およびB28-01間）に新設された1.4m直線部では、鉛直方向 β 関数を0.4mに設定することが可能になった。我々は、この直線部に最小ギャップ4.5mmの真空封止型短周期アンジュレータ（SGU#17）を建設・設置した[4]。SGU#17の建設において、我々は周期長（ λ_u ）12mmおよび16mmの2組の磁石配列（Halbach型）について短周期磁気回路の研究開発を行った。磁気回路に許容される長さから $\lambda_u=12\text{mm}$ については周期数（N）は39、 $\lambda_u=16\text{mm}$ についてはN=29となる。最終的に、利用実験の要求を満たすために $\lambda_u=16\text{mm}$ を採用することにより、1-7次高調波によって15keVまでのエネルギー領域をカバーした：K=1.05の時、5次光によって12keVの光子エネルギーを達成。

磁石素材としては、優れた磁気特性ばかりでなく真空加熱排気時の高温に耐える、Nd-Fe-B系合金（NEOMAX35VH: Br=12kG, およびiHc=28kOe）を採用した。真空封止のために磁石表面に5 μm 厚のTiNコーティングを施した。各磁石を無酸素銅製のホルダに固定した上で、Al合金製の磁石取り付けビーム上に配列した。

上記の磁石列は、ステンレス鋼製の真空槽（内面を電解研磨処理、サイズは内径250mm × 長さ980mm）に収納される。この真空槽は、Tiゲッターポンプとスパッタイオンポンプによって排気される。磁石ギャップは、4.5mmを最小値として設計したが、機械的には40mmから3mmまで可変である。ギャップ4.5mmでの偏向定数（K）は、 $\lambda_u=16\text{mm}$ の場合1.27であり、 $\lambda_u=12\text{mm}$ の場合0.72である。電子ビームによる抵抗ロスおよび寄生モードロスから生じる問題を避けるために、磁石列の対向面を無酸素銅製の箔（60 μm 厚）で覆った。この銅箔にのNiを鍍金（25 μm 厚）することにより磁石列へ密着を容易にした。さらに、可動である磁石列の両端と真空槽内壁との間をBe-Cu製の箔（180 μm 厚）で作ったコンタクタによって接続した。このコンタクタは、KEKのPF-AR（6.5GeV）におけるU#NE3真空封止アンジュレータ（世界初の真空封止型アンジュレータ）で採

用したコンタクタの改良型である[5]。磁石ギャップが非常に狭い場合に予想される抵抗ロスによる発熱を避けるためにコンタクタ基底ブロックに水冷パイプを装着した。SGU#17の内部構造を図3に示した。

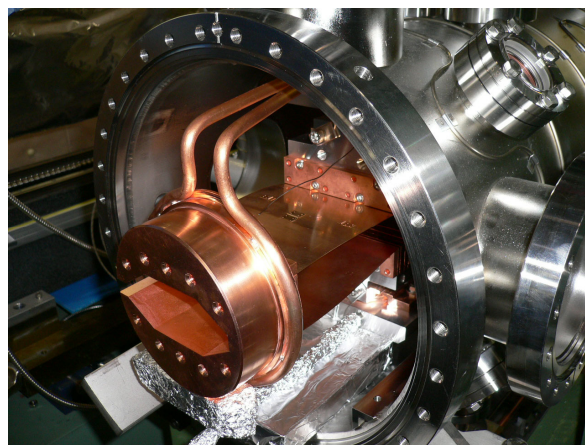


図3. 短周期アンジュレータSGU#17の内部構造。

3. 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、3mmまでの狭い磁石ギャップに挿入可能である。さらに、室温領域において0.01 $^{\circ}\text{C}$ の精度でホール素子の温度を制御することが可能である[6]。

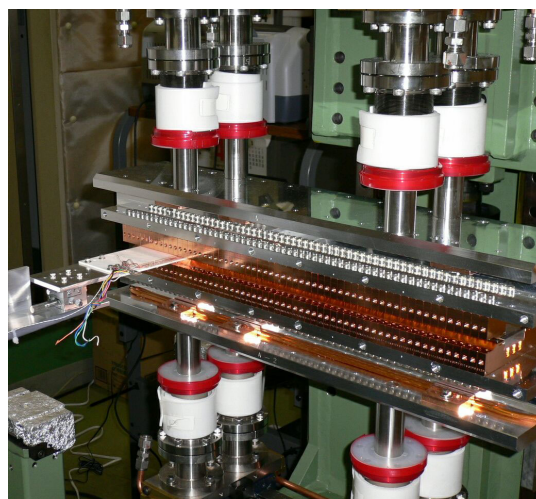


図4. 磁場調整中のSGU#17。

磁場調整においては、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、 $\lambda_u=16\text{mm}$ の場合、図5に示したように非常に良好である。磁場調整はギャップ5mm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。図5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も非常に満足すべき結果が得られたことを示している。図5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5においては、アンジュレータ入り口における蹴り角を積分磁場として BS_{ENT} (Gcm)によって示した。

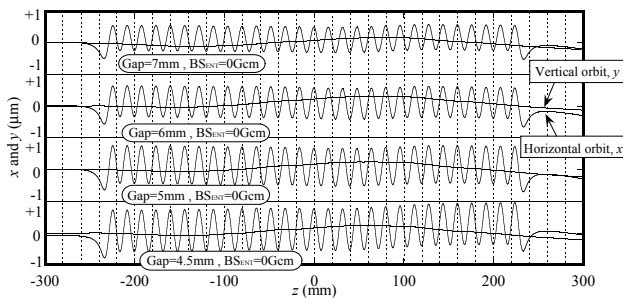


図5. SGU#17の磁場調整の結果のまとめ。 $\lambda_u=16\text{mm}$ の場合について鉛直 (y) および水平 (x) 方向の電子軌道として表した。

誤差磁場の影響は、実測磁場から求めた放射の Brilliance が理想磁場に対するそれより劣化する程度によって明瞭に示すことができるが、今回の結果は、 $\lambda_u=16\text{mm}$ の場合5次光においても94%もの高い値を維持している。 $\lambda_u=12\text{mm}$ の場合は3次光において96%である (ともにギャップ5mmの時)。

4. SGU#17の立上げと放射の評価

SGU#17の真空立上げを 120°C で行った。48時間の加熱排気の後、 7.5×10^{-10} Torrの真空度を得た。全てのアンジュレータ磁石に対して着磁後磁場調整前に、磁場安定化のための高温処理を 145°C において実行した。これは 120°C での真空立上げ時に、高温減磁のためにアンジュレータ磁場が劣化するのを防ぐためである[2, 5]。

SGU#17および付随するビームラインの立上げは、2005年9月のPF運転再開後順次行われている[1, 7]。この過程で、我々はSGU#17の磁石ギャップを、電子ビーム寿命の低下なしに、最小で3.8mmまで閉じられることを確認した (設計値は4.5mm)。さらにSGU#17のギャップは、PF2.5GeVリングの運転とは全く独立に自由に (いかなる軌道補正もなしに) 変更可能であることも判明した。これは上述したように磁場調整が非常に上手くできたことの効果の一つである。ギャップの全可動範囲において、鉛直および水平方向の軌道変動は $5\mu\text{m}$ 以内である。

付随ビームラインにおいて行った放射評価のためのスペクトル測定の結果を図6に紹介する。この測定では、光源点から17.5m地点に置かれたSi(111)二結晶分光器で光子のエネルギーを選定し、35m地点に置かれた2次元スリットによって角度開口の選定を行っている。光子数は2次元スリットの後方に置かれたイオンチャンバによって計測した。二結晶分光器は液体窒素によって冷却されており、放射光の熱負荷に

よる分光結晶の歪みは最小化されている。それでも微小に残る分光結晶の熱歪みの影響は分光結晶のロッキングカーブを測定し取り除いた。また分光結晶の反射率の影響、各種の窓および光路上の大気等による吸収の影響を補正して、光子数を求めた。2次元スリットの角度開口は $23\mu\text{rad} \times 23\mu\text{rad}$ である。電子ビーム電流値は400mAに規格化してある。ここで示したスペクトルは現在解析継続中の暫定版である。さらに検討を進めてPFリングの電子ビーム性能の評価に結びつけたい。比較のために、設計パラメータに対応する放射スペクトルの計算値も示してある。

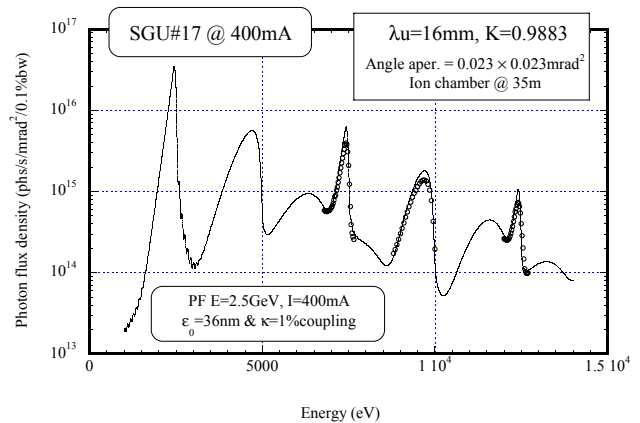


図6. SGU#17の放射スペクトル：暫定版。

参考文献

- [1] T. Honda, et al., "Commissioning of the PF Ring after the Reconstruction for the Straight-sections Upgrade", Proc. SRI2006, Daegu, Korea (2006).
- [2] S. Yamamoto, K. Tsuchiya and T. Shioya, "Construction of Two New In-vacuum Type Tapered Undulators for the PF-AR", AIP Conference Proc. 705, 211-214 (2004).
- [3] Y. Kobayashi, Photon Factory Activity Report 2003 #20, 98-100, see also <http://pfwww.kek.jp/pfacr/index.html>.
- [4] S. Yamamoto, K. Tsuchiya and T. Shioya, "Construction of a Very Short Period Undulator, SGU#17 and the Photon Factory Upgrade", Proc. SRI2006, Daegu, Korea (2006).
- [5] S. Yamamoto et al., "Construction of an In-vacuum Type Undulator for Production of Undulator X Rays in the 5-25keV Region", Rev. Sci. Instrum. 63(1), 400-403 (1992).
- [6] S. Yamamoto et al., "Superbrilliant X-ray Undulator for the Tristan Super Light Facility", Rev. Sci. Instrum. 66(2), 1996-1998 (1995).
- [7] N. Igarashi et al., BL-17A, "A new protein micro-crystallography beam line of the Photon Factory", Proc. SRI2006, Daegu, Korea (2006).