

極短周期アンジュレータの設置に最適化した小型電子蓄積リングの設計

DESIGN STUDY OF SMALL ELECTRON STORAGE RING FOR INSTALLATION OF VERY SHORT PERIOD UNDULATORS

大熊春夫^{#, A), B)}, 山本 樹^{C), D)}

Haruo Ohkuma^{#, A), B)}, Shigeru Yamamoto^{C), D)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Center (JASRI)

^{B)} Aichi Synchrotron Radiation Center

^{C)} Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

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

Abstract

There are various limitations to install very short period undulators of $\lambda_u = 2 \text{ mm} - 6 \text{ mm}$ in an existing storage ring. For the strength of the magnetic field to reduce because of very short period undulator, it is necessary to make 2 mm of gap of undulator below, but the smallest gap is limited by the vertical betatron function in the straight section. The length of the straight section is not also optimized for the very short period undulators. Therefore, we have done the design studies of the storage ring which can be installed more than 10 of very short period undulators. The designed storage ring is 14 cells lattice structure. The standard unit cell (length is 4.08 m) of the designed storage is consisting of a 3.8 T superconducting bending magnet, two quadrupole magnets and two sextupole magnets. Beam energy 1.5 GeV, circumference 60.12 m and natural emittance 23.9 nm-rad (effective emittance 35.7 nm-rad) was designed by twelve standard unit cells with 1 m straight section for installation of very short period undulator (vertical betatron function $\beta_y = 0.243 \text{ m}$ at the center of straight section) and two long straight sections with 2.5 m straight section for installations of an injection system and an RF cavity. If the synchrotron radiation source proposed here will be achieved, it equals a medium size synchrotron radiation source mainly composed of undulator beamlines, which is different from a conventional small size synchrotron radiation source and leads to realization of the low-cost synchrotron radiation source miniaturized substantially.

1. はじめに

低エネルギー光源加速器において、低次アンジュレータ放射を用いた高エネルギーの放射光の実用化を目指して、極短周期アンジュレータの研究開発を行ってきた[1]-[5]。極短周期アンジュレータは通常型アンジュレータの周期長(数 cm)の約 1/10 の周期長の実現を目指している。これまでの研究では周期長 $\lambda_u = 2 \text{ mm} - 6 \text{ mm}$ を目標に設定し、幅 20 mm × 厚さ 2 mm × 長さ 100 mm ($\lambda_u = 4 \text{ mm}$ の場合 25 周期) (または 152 mm (38 周期)) の板状の NdFeB 製磁性素材に、周期的交番磁気回路を高精度・高強度で書き込む方式の開発を行ってきた。着磁後に対向させた一対の磁石板の間の隙間(磁石ギャップ)にアンジュレータ磁場を生成することができる。

このような極短周期アンジュレータを既存の蓄積リングに設置するには様々な障害があり、ごく限られた使用しか出来ない。周期長を短くする事により磁場の強度が低減するため、ギャップを 2 mm 以下とする必要があるが、設置をする直線部のベータロン関数により最小ギャップに制限がある。また、直線部の長さも極短周期アンジュレータには最適化されていない。そこで、設計段階から周期長 $\lambda_u = 2 \text{ mm} - 6 \text{ mm}$ 、アンジュレータ磁石長 $L = 0.7 \text{ m}$ 程度(複数の磁石板を長手方向に接続して実現する。周期長 2 mm で 350 周期)の極短周期アンジュレータを 10

台以上 (= ビームライン数) 設置する事を前提としたリングの設計検討を行った。

まだ、未検討事項もあるが、1 台の 3.8T 超伝導偏向電磁石と各々 4 台の四極および六極電磁石により 4.08 m 長のユニットセルを組み、14 セルラティスの設計を行った。アンジュレータ設置部の 12 箇所 の 1 m 直線部(直線部中心での垂直ベータロン関数 $\beta_y = 0.243 \text{ m}$)を持つ標準ユニットセルと、入射と高周波加速空洞設置のために拡張した 2 箇所 の 2.5 m 直線部を持つ長直線セルにより、エネルギー 1.5 GeV、周長 60.12 m、自然エミッタンス 23.9 nm-rad (実効エミッタンス 35.7 nm-rad) の蓄積リングを設計した。ここで提案する放射光源リングが実現できれば、偏向電磁石ビームラインを主体として数本のアンジュレータビームラインを加えた構成の従来の小型の放射光源リングとは異なる、アンジュレータビームラインを主体とした中型以上の規模の放射光源リングに匹敵するだけでなく、大幅に小型化された低コストの放射光源リングの実現に繋がると考えている。

これまでの検討結果と今後の展望について述べる。

2. 蓄積リングの設計条件

蓄積リングの設計条件として以下の指針を設定した。

- (1) 電子ビームエネルギー 1.5 GeV (周期長 2 mm の極短周期アンジュレータでの基本波として約 10 keV が実現できる)
- (2) 周長は 70 m 以下

[#] ohkuma@spring8.or.jp

- (3) 実効エミッタンスは 40 nm-rad 以下とする
- (4) 極短周期アンジュレータが 10 台以上設置できる直線部を有すること
- (5) 直線部の長さは 0.8 m 以上を確保する
- (6) 極短周期アンジュレータのギャップ 2 mm 以下を可能とする直線部の低垂直ベータトロン関数を実現する

3. ラティス設計

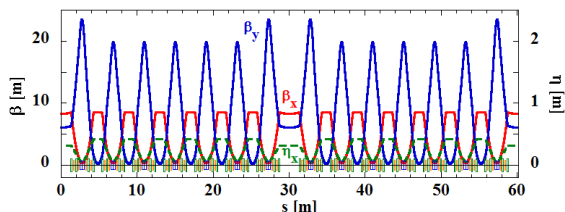


Figure 1: Optical function of 14-cell storage ring. The whole ring is shown.

Figure 1 に設計した 14 セル蓄積リング全体のオプティクス関数を示す。リング全体は、12 の標準ユニットセル(4.08 m)と 2 つの長直線セル(4.83 m)で構成されている。標準セルは四極電磁石の有効磁場端間の長さ 1.0 m の直線部を持つ。これらの 12 箇所の直線部にはアンジュレータ磁石長 $L = 0.7$ m 程度の極短周期アンジュレータが設置出来る。

Figure 2 には、ユニットセルの磁石ラティス構造とそのオプティクス関数を示す。Combined 型偏向電磁石 1 台と 2 ファミリーの四極磁石と同じく 2 ファミリーの六極電磁石から構成される。直線部の垂直ベータトロン関数 $\beta_y = 0.243$ m, 水平分散関数は $\eta_x = 0.423$ m である。

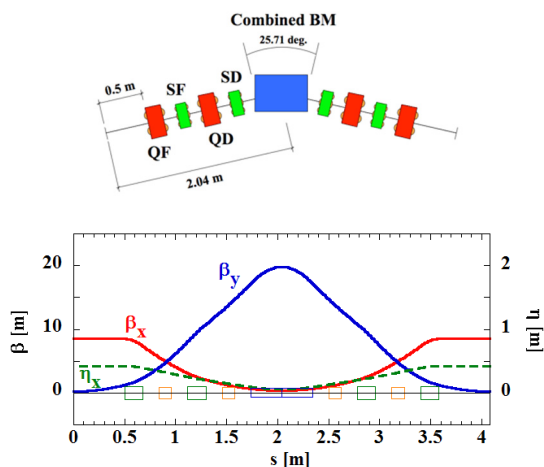


Figure 2: Magnetic lattice of a normal unit cell (Upper Figure). Optical function of a normal unit cell (Lower Figure). Vertical betatron function β_y is 0.243 m at the center of straight section. $\beta_x = 8.478$ and $\eta_x = 0.423$ m.

Figure 3 には、ビーム入射部、高周波加速空洞の設置部としての使用を想定した長直線部(長さ 2.5 m)を持つ長直線セルのオプティクス関数を示す。この直線部にも $\eta_x = 0.319$ m の水平分散がある。

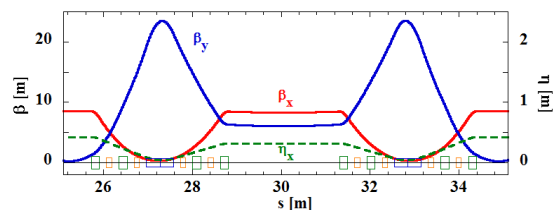


Figure 3: Optical function of a long straight cell of 2.5 m. $\beta_x = 8.290$ m, $\beta_y = 6.025$ m, and $\eta_x = 0.319$ m at the center of long straight section.

設計した蓄積リングのパラメーターを Table 1 に示す。自然エミッタンスは 23.9 nm-rad であるが、直線部に分散があるので、光源点の実効エミッタンスは、水平分散関数 $\eta_x = 0.423$ m と相対エネルギー拡がり $\sigma_\delta = 0.118$ % を考慮して、 $\epsilon_{eff} = \epsilon \sqrt{1 + (\eta_x \sigma_\delta)^2} / \beta_x \epsilon = 35.7$ nm-rad となる。チューンの端数部は成り行きのままであり調整はしていない。また、RF 周波数とハーモニック数は、周波数を 500 MHz 付近として適当なハーモニック数を探したものであり、実際には詳細な検討が必要であると考えている。

Table 1: Design Parameter of Storage Ring

Circumference	60.12 m
Straight Sections	1m × 12, 2.5 m × 2
Beam Energy	1.5 GeV
Natural Emittance	23.9 nm-rad
Effective Emittance	35.7 nm-rad
Momentum Compaction Factor	0.006970
Betatron Tunes	(5.9061, 5.5158)
Natural Chromaticity	(-11.8, -28.0)
Energy Spread	0.00118
RF Frequency	498.66 MHz
Harmonic Number	$100 = 2^2 \times 5^2$
Radiation Loss	335.0 keV/turn
Damping Partition Numbers	$J_x = 1.217$ $J_y = 1.000$ $J_s = 1.807$
Damping Time	$\tau_x = 1.474$ $\tau_y = 1.798$ $\tau_s = 1.006$
xy-Coupling	0.005
Stored Beam Current	300 mA

Table 2 には、電磁石のパラメーターを示した。偏向電磁石は Combined 型で QD 成分を持っている。磁極断面形状も計算したが、特に問題はなかった。六極電磁石は、クロマチシティが $(\xi_x, \xi_y) = (+1, +1)$ となるように励磁した場合の値を示している。ハーモニック補正のための六極電磁石は設置しておらず、2ファミリーのみである。

更なる検討として、リング全周で六極電磁石の励磁パターンを最適化すれば、より広いダイナミックアパーチャーを得る事が出来ると考えている。

Table 2: Magnet Parameters

BM	L [m]	0.6 m
	ρ [m]	1.3369 m
	B [T]	3.743 T
	B' [T/m]	-7.490 T/m
	B ρ [Tm]	5.0035 Tm
	B'/(B ρ) [m ⁻²]	-1.4969 m ⁻²
	n	-2.6754
QF	L [m]	0.18 m
	B' / [B ρ] [m ⁻²]	4.309 m ⁻²
	B' [T/m]	21.560 T/m
QD	L [m]	0.18 m
	B' / [B ρ] [m ⁻²]	-1.874 m ⁻²
	B' [T/m]	-9.376 T/m
SF	L [m]	0.12 m
	B'' [m ⁻³]	4.718 m ⁻³
	B'' [m ⁻³]	39/32 m ⁻³
	B'' [T/m]	196.72 T/m
SD	L [m]	0.12 m
	B'' [m ⁻³]	-8.626 m ⁻³
	B'' [m ⁻³]	-71.88 m ⁻³
	B'' [T/m]	-359.67 T/m

4. ダイナミックアパーチャーとベータトロンチューン

Figure 4 に長直線部中央でのダイナミックアパーチャーの計算結果を示す。右の図は $y = 0$ とした水平方向位相空間の計算結果である(ポアンカレマップ)。この結果から、入射については特に問題はないと考えているが入射の方式、トップアップ運転の有無などは未検討である。チューン端数部の取り方により位相空間の形は円に近い形になると思われる。

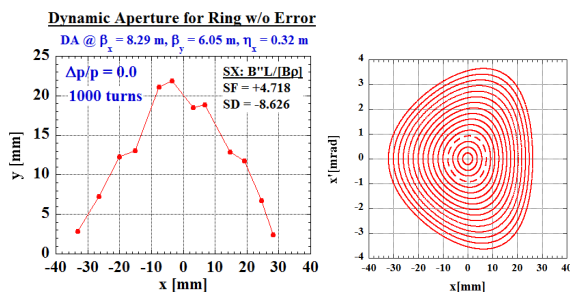


Figure 4: Dynamic aperture at the injection point of the 14-cell storage ring without magnetic errors (Left Figure). Horizontal Poincaré map with $y = 0$ (Right Figure).

Figure 5 はベータトロンチューンの振幅依存性、Figure 6 はベータトロンチューンのエネルギー依存性(非線形クロマチシティ)を計算した結果である。これらの計算ではリングの電磁石エラーは考慮していないが、チューンの設定値を適切な値にすれば、電磁石エラーを考慮しても ± 5 %程度のモーメントムアクセプタンスは得られると考えている。ただし、更にアンジュレータの設

置台数を増やすためにセル数を増やした場合には、垂直方向のクロマチシティの2次の項の寄与が大きくなり、注意深い検討が必要になると思われる。

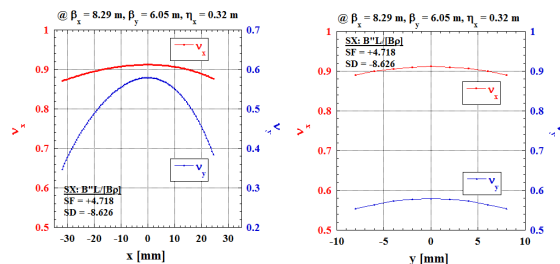


Figure 5: Amplitude dependence of betatron tunes without magnetic errors.

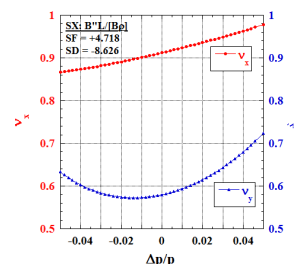


Figure 6: Energy dependence of betatron tunes (nonlinear chromaticities) without magnetic errors.

5. ビーム寿命の評価

5.1 タウチェック寿命の評価

Figure 7 に高周波加速空洞の電圧に対するタウチェック寿命の計算結果を示す。この計算では Intra-Beam Scattering (IBS)の効果は考慮していない。しかしながら、IBS はバンチの体積を増やし、寿命を延ばす方向に作用するので、極短周期アンジュレータの狭ギャップによりビーム寿命が短くなる影響を評価するという本研究の検討では、IBS を考慮していないことは厳しい方向に働くと考えられるので、IBS 効果の考慮はいずれ行う事にした。仮定したパラメータは、蓄積電流 300 mA、フルバンチファイリング、xy カップリングは 0.5 %、モーメントムアクセプタンスは ± 0.5 %で場所に寄らず一定とした。バンチ長はゼロ電流リミットの値を用いた。実際には、バンチ電流に依存してバンチ長が伸び、ビーム寿命が長くなる方向に寄与すると考えられる。

5.2 残留ガス散乱寿命の評価

Figure 8 には、真空チェンバ内の残留ガス散乱によるビーム散乱寿命の計算結果を示した。ガス散乱寿命は、Möller 散乱、

$$\frac{1}{\tau_M} = cN \sum_i Z_i \sigma_M$$

$$\sigma_M = \text{Max} \left\{ \frac{2\pi r_e^2}{\gamma} \frac{1}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_c}, \frac{4\pi r_e^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_c^2} \right\}$$

Rutherford 散乱,

$$\frac{1}{\tau_R} = cN \sum_I \sigma_R$$

$$\sigma_R = \frac{4\pi Z_i^2 r_e^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_c^2}$$

制動放射,

$$\frac{1}{\tau_B} = cN \sum_i \sigma_B$$

$$\sigma_B = 4\alpha r_e^2 Z_i (Z_i + 1)$$

$$\times \left\{ \frac{4}{3} \ln \frac{1}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_c} - \frac{5}{6} \right\} \ln \left[183 \cdot Z_i^{-\frac{1}{3}} \right]$$

を考慮した。ここで、 $1/\theta_c^2$ は、チェンバのアーチャーを表す関数であり、ここではチェンバ形状として楕円を仮定した。

残留ガスの分圧比は、水素 (H₂) : 一酸化炭素 (CO) = 80% : 20%とした。通常の電子蓄積リングの残留ガス分圧比としては妥当な値であると考えられる。赤線は、極短周期アンジュレータのギャップが開いている時、すなわち、垂直ベータatron関数とチェンバの垂直方向のギャップを考慮して、散乱されたビームが失われる場所を決めた場合に、その場所でビームが失われる場合の残留ガスの全圧に対するガス散乱寿命を示したものである。ビームが失われる場所は、偏向電磁石チェンバ部であり、この場所では $\beta_y = 23.5$ m であり、チェンバの垂直アーチャーを ± 10 mm と仮定した。この場合、 1×10^{-7} Pa でガス散乱寿命は 100 時間近くになり、タウシエック寿命と合わせて、全ビーム寿命 $1/\tau_{total} = 1/\tau_T + 1/\tau_{Gas}$ は 50 時間程度となる。青線は、極短周期アンジュレータのギャップを 1.5 mm とした場合で、散乱されたビームは極短周期アンジュレータ端部の $\beta_y = 0.747$ m の場所 (1 m 直線部の中心から、アンジュレータ長 0.7 m の 1/2 の 0.35 m 離れた場所) で失われる。 1×10^{-7} Pa でガス散乱寿命 23 時間、全ビーム寿命は 20 時間程度となる。ビーム運動が進み定常状態に達した場合には、CO の分圧が低くなる事が期待される。緑線は、残留ガスの分圧比を H₂ : CO = 90% : 10%とした場合であり、全ビーム寿命は 30 時間程度は確保できると期待できる。

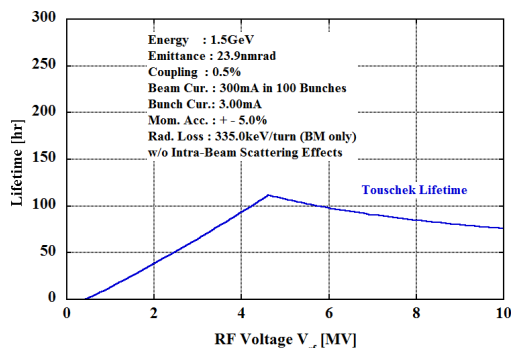


Figure 7: Tauschek lifetime versus RF voltage of the 14-cell storage ring.

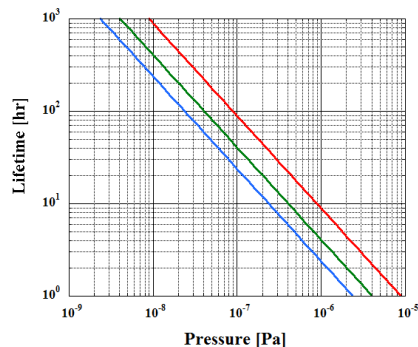


Figure 8: Gas scattering beam lifetime.

6. アンジュレータスペクトル

Figure 9は、3つの異なる周期長 ($\lambda_u = 6$ mm, 4 mm, 2 mm) の極短周期アンジュレータを設計したリングに設置した場合の輝度を計算したものである。アンジュレータ長はどの場合も $L = 0.7$ m とした。蓄積電流は 300 mA, xy カップリングは 0.5 % を仮定して、相対エネルギー拡がり 1.18 %, 水平分散 $\eta_x = 0.423$ m を考慮して計算した。 $\lambda_u = 4$ mm の場合の磁場強度は実際の極短周期アンジュレータの開発で得られた値であり[1], その他の周期長の磁場強度はその値をスケールして求めた値を用いている。計算の結果からは、 $\lambda_u = 6$ mm, ギャップ 1.5 mm では 10^{18} phs/s/mm²/mrad²/0.1%bw に達する輝度が、光子エネルギー 3 keV で得られており、 $\lambda_u = 2$ mm では ギャップ 1.5 mm で、10keV で 10^{16} を超える輝度が得られる事が期待される。

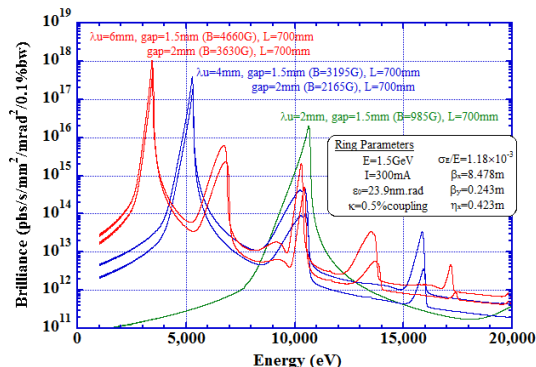


Figure 9: The brilliance with three different very short period undulators ($\lambda_u = 2$ mm, 4 mm and 6 mm).

7. まとめと今後の展望

7.1 まとめ

開発を進めてきた狭ギャップ極短周期アンジュレータが、直線部の垂直ベータatron関数を十分に小さくする事により、蓄積リングの性能を損ねることなく、共存・設置可能で、アンジュレータビームラインを主体とした小型放射光源として十分な性能を持っていることを示す事が出来た。ここで設計した蓄積リングは直線部の水平分散 η_x の存在を許すことによりユニットセルの長さを短くして、出来るだけ多くの極短周期アンジュレータの設置を可能に

したものである。周長 60.12 m のリングは、 $L = 0.7$ m の極短周期アンジュレータ 12 台が設置できる 1 m 長(四極電磁石の有効磁場端間の長さ)の直線部を持つ 12 の標準の標準ユニットセルと入射部と高周波加速空洞設置部のための 2 つの長直線セルから構成される。実効エミッタンス $35.7 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ であり、タウチェックビーム寿命、ガス散乱ビーム寿命の評価により、極短周期アンジュレータのギャップ 1.5 mm でもチェンバ内の圧力 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 以下でビーム寿命 30 時間程度が確保出来るという結果を得る事が出来、実現性に問題がないことを確認した

アンジュレータスペクトルは、周期長 $\lambda_u = 6 \text{ mm}$ 、ギャップ 1.5 mm では $10^{18} \text{ phs/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\%bw$ に達する輝度が光子エネルギー 3 keV で得られており、 $\lambda_u = 2 \text{ mm}$ ではギャップ 1.5 mm で 10keV で 10^{16} を超える輝度が得られるという事が期待される結果を得た。

本研究で得られた結果から、更に詳細な検討を加えて提案する放射光源リングが実現できれば、偏向電磁石ビームラインを主体として数本のアンジュレータビームラインを加えた構成の従来の小型の放射光源リングとは異なる、アンジュレータビームラインを主体とした中型以上の規模の放射光源リングに匹敵するだけでなく、大幅に小型化された低コストの放射光源リングの実現に繋がると考えている。

7.2 今後の展望

詳細な検討が不足している箇所があるので、更に検討と最適化を進める必要があると考えている。直線部の長さやアンジュレータ磁石長および最小ギャップの最適化を行う必要がある。また、電磁石の具体的な検討を行うことにより、更にリングの小型化、最適化が可能であると考えている。

また、今回のリングの設計では、最適化が十分でないものがあり、例えばチューンの調整、具体的には垂直

チューンの端数部は少し上げた方が良いと考えている。振幅依存チューンの動き (v_y vs. ξ) から、 ξ が増えていくと v_y が半整数を横切ってしまう恐れがあり、今のままではエラーを入れた時にダイナミックアパーチャーが縮むと考えられる。ビーム寿命の評価では、IBS 効果の影響評価を行う必要がある。また、狭ギャップ極短周期アンジュレータを設置した場合のビームロスの詳細な評価、どこでビームロスさせるのが良いかなどの検討も必要である。

謝辞

本研究のラティスの計算は高輝度光科学研究センターの早乙女 光一氏によって行われたものであり、ここに感謝の意を表します。また、本研究の遂行の一部において、JSPS 科研費 26246044 の助成を受けています。

参考文献

- [1] 山本 樹, “極短周期アンジュレータの開発 III”, 第 13 回日本加速器学会プロシーディングス(千葉) (2016) pp.1035-1039;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP066.pdf
- [2] S. Yamamoto, “DEVELOPMENT OF THE VERY SHORT UNDULATORS”, Proc. IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, pp. 1845-1857;
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/weoaa02.pdf>
- [3] 山本 樹, “コンパクト放射光源としての極短周期アンジュレータの開発”, レーザー研究, 第 45 巻第 2 号 (2017) pp. 82-86.
- [4] S. Yamamoto, “Undulator Development Towards Very Short Period Lengths”, Synchrotron Radiation News, Vol. 28, No. 3, 2015, pp.19-22.
- [5] 山本 樹 他, “極短周期アンジュレータの開発と最初の放射の観測実験”, 本加速器学会年会, THOL11.