

# ニュースバル電子蓄積リングの upgrade に向けた検討 UPGRADE DESIGN FOR NEWSUBARU-2.0 STORAGE RING

橋本智#, 宮本修治

Satoshi Hashimoto #, Shuji Miyamoto

Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI), University of Hyogo

## Abstract

We have been studying the upgrade plans for the NewSUBARU storage ring. The “NewSUBARU-2.0” ring with the lower-emittance electron beam generates the higher-brightness radiation than the current ring. In this paper, the current status of the design study is reported.

## 1. はじめに

軟 X 線領域の中型放射光施設である兵庫県立大学ニュースバル放射光施設[1,2]は放射光の産業利用、特に EUV リソグラフィや LIGA などの微細加工、放射光による分析、コンプトン散乱ガンマ線の発生とその利用等の分野で用いられている。供用開始からもうすぐ 20 年が経過するが、これまで特に大規模な機器更新や改造は行われなかった為、最近では機器の故障、特に電磁石電源の故障による運転中断や運転規模の縮小を余儀なくされることも多く、近い将来に大幅な機器の更新を必要とする。

また一部の利用者から放射光の高輝度化の要求もあり、将来も施設の研究活動を維持していくためには性能向上に向けた光源加速器の改造が必要になってくる。

そこで我々は将来の加速器の改修に向けてアップグレード案の検討に着手した。幾つかの案が考えられるが、リングの低エミッタンス化による高輝度放射光の発生は有力な案の一つである[3]。ただし予算の問題から既存の建屋や遮蔽トンネルを可能な限り流用することが現実的であり、リングの大きさや形状は現在とほぼ同じでなければならない。そのような制約の下で、比較的エネルギーが低く、周長も短いリングでどの程度まで低エミッタンス化が実現できるかが問題となる。本発表では低エミッタンス化に向けた加速器のアップグレード案(ここでは NewSUBARU-2.0 と仮称)のこれまでの検討結果について報告する。

## 2. NewSUBARU 現行リングの概要

まず、現在の NewSUBARU 電子蓄積リングの概要について説明する。現在のリングは周長が 118m のレーストラック型で、周長に対して比較的長い約 11m の直線部を有するのが特徴である(図 1)。SPRING-8 線型加速器から 1.0GeV 電子ビームを入射し、1.0GeV では 300mA で Top-up 運転を行える他、入射後に蓄積エネルギーを 0.5~1.5GeV の範囲で変えることが出来る。

蓄積リングは6セルで構成され、1セルは図 2 に示すように偏向角度 34° の二台の偏向電磁石とその間にある-8° の逆方向偏向電磁石で構成されるので、1セル当たりの偏向角度は 60° になる。セル当たり 4 ファミリーおよび長直線部でのラティス関数のマッチング用に 3

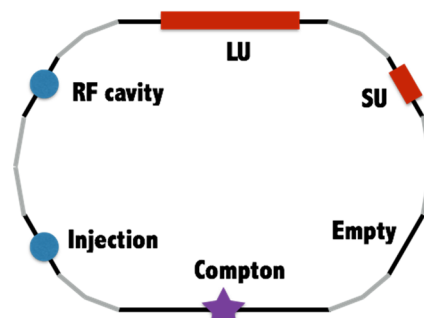


Figure 1: General layout of the NewSUBARU storage ring and the usage of its straight sections.

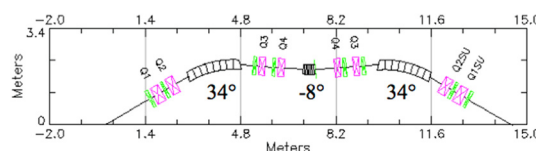


Figure 2: Geometrical plot of magnets per cell in NewSUBARU. The cell is composed from two 34 degrees bends and one -8 degrees inversely bending magnet.

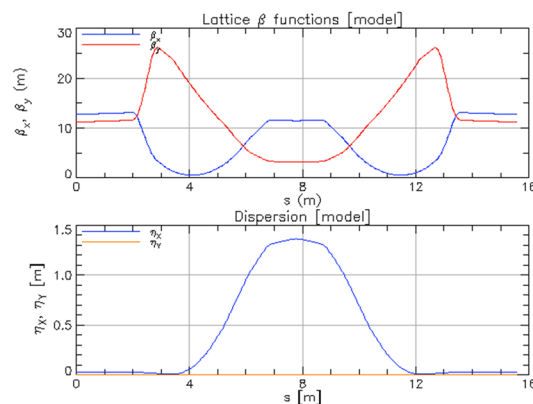


Figure 3: Horizontal and vertical beta functions and horizontal dispersion function of NewSUBARU ring.

# hashi@lasti.u-hyogo.ac.jp

ファミリーの四極電磁石を使用する。図3にセル当たりの水平・垂直方向の $\beta$ 関数および水平方向分散関数を示す。1.0GeV 運転時の自然エミッタンスは 37 nm-rad である。

挿入光源として長直線部の一つに長尺アンジュレーター(全長 10.8m, 周期数 200)、短直線部の一つに短尺アンジュレーター(全長 2.28m, 周期数 30)がインストールされている。他の短直線部は高周波加速空洞と入射用セプタム電磁石に使用し、残る一つは空きの状態である。もう一箇所の長直線部はレーザコンプトン散乱ガンマ線の発生に使用される。

### 3. 低エミッタンスリング NewSUBARU-2.0

蓄積リング内の電子ビームの自然エミッタンスは次式で表される[4]。

$$\epsilon_{s,0}[\text{nm} \cdot \text{rad}] = 1470 \frac{(E[\text{GeV}])^2}{J_s} \frac{\Phi^3 F}{12\sqrt{15}} \quad (1)$$

ここで E は蓄積エネルギー、 $J_x$  は水平方向パーティションナンバー、 $\Phi$  は偏向電磁石 1 台の偏向角度、F はラティスタイプで決まるファクターである。エミッタンスを減少するには基本的に、周長を大きくして偏向電磁石の台数を増やせば良いのだが、我々のケースでは周長は大きく出来ないし、遮蔽トンネルで決まるリング形状もあまり変えられない。逆方向偏向電磁石を撤去して、セル当たりの偏向電磁石が3台の TBA (Triple Bend Achromat) および 4 台の QBA (Quadruple Bend Achromat) の各場合について、どの程度までエミッタンスを小さく出来るか、MADX[5]、Bmad [6]、elegant [7]等のラティス計算ツールを用いて評価を行った。

TBA の場合の偏向電磁石と四極電磁石の幾何学的な配置を図4にラティス関数を図 5 に示す。水平方向に defocus な四極磁場成分を持つコンバインド型の偏向電

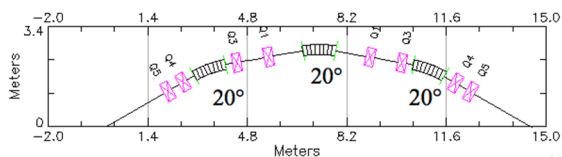


Figure 4: Geometrical plot of Triple Bend Achromatic cell.

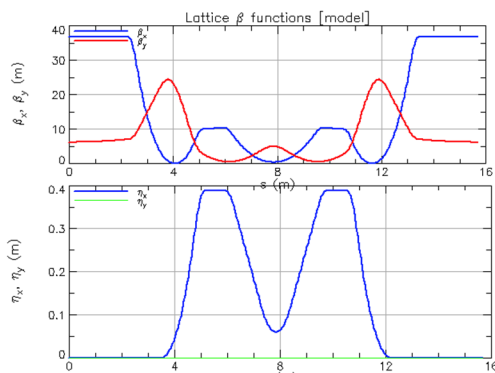


Figure 5: Lattice functions of TBA. Horizontal and vertical beta functions (upper) and horizontal dispersion (lower).

磁石を採用した。これにより四極電磁石の台数を減らすとともに、 $J_x$  が若干増加するのでエミッタンスの改善に寄与できる。四極電磁石の位置や強さの調整の結果、1.0GeV 時の自然エミッタンスは 5.5nm-rad であった。

QBA の場合の偏向電磁石と四極電磁石の幾何学的配置を図 6 に、ラティス関数を図 7 に示す。一般的にエミッタンスを理論的最小値に近づけるために、セル両端の偏向電磁石の偏向角度を両端以外の電磁石の半分程度にするが、このケースではセル長が限られており、セルあたりの偏向角度も固定のため、反対にエミッタンスが増加してしまった。したがって、4 台の偏向電磁石の偏向角度を同じにしている。この時の最小エミッタンスは 2.2nm-rad であった。ただしセル長が短いため図6を見て分かるように偏向電磁石と四極電磁石だけでかなり窮屈であり、六極以上の電磁石、モニター、真空装置等の配置やビームラインの接続を考慮しなければならないので、具体的な設計にはかなりの困難を要するよう思えるが、詳細な検討は今後の課題である。

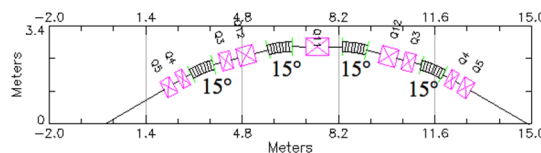


Figure 6: Geometrical plot of Quadruple Bend Achromat cell.

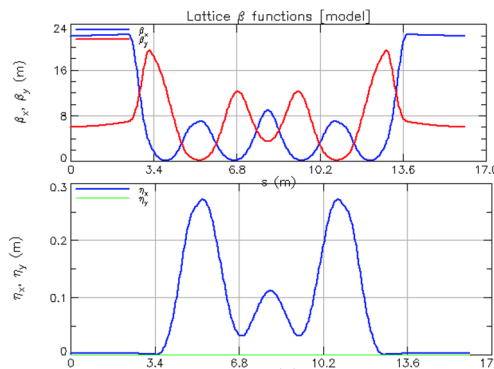


Figure 7: Lattice functions of QBA. Horizontal and vertical beta functions (upper) and horizontal dispersion (lower).

### 4. NewSUBARU2.0 の放射光の特性および挿入光源の検討

本章では NewSUBARU-2.0 での放射光の特性を評価し、直線部の有効な活用について検討する。

#### 4.1 偏向電磁石およびウィグラーからのシンクロトン放射光

図8に現在の NewSUBARU 偏向電磁石からのシンクロトン放射光のスペクトルを破線で示す。1.0 および 1.5 GeV 運転時の放射光臨界エネルギーはそれぞれ 0.7 と 2.3 keV である。ニュースバルでは「加工」のユーザーは高エネルギー光子を望む為、利用時間の 40%弱が 1.5GeV 運転である。このため過去にも超電導電磁石に

よる Super-bend を用いた 1.0GeV 運転での高エネルギー光子の発生が検討された[8]。

先に述べた TBA タイプの NewSUBARU-2.0 を 1.0GeV で運転した時のシンクロトロン放射とウィグラー放射の輝度スペクトルも図 8 に示した。典型的なウィグラー

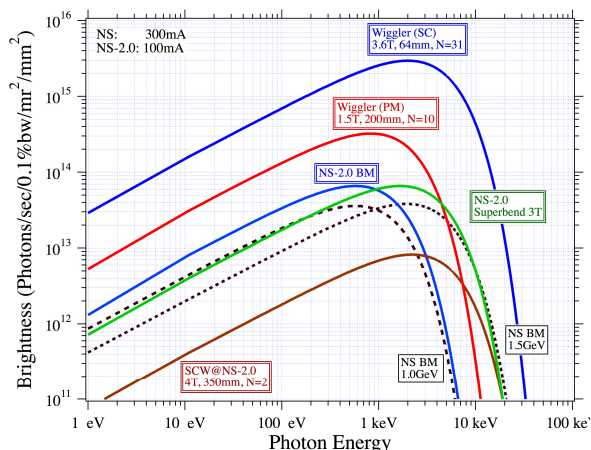


Figure 8: Brightness of synchrotron radiation from bends and wigglers. Dotted lines are bending radiation of NewSUBARU at 1.0 and 1.5 GeV. The stored beam energy of NewSUBARU-2.0 is 1.0 GeV.

Table 1: Typical Wiggler Parameters

Wiggler	#1	#2	#3
Type	SC	PM	SC
B <sub>w</sub> [T]	4.0	1.5	3.6
λ <sub>w</sub> [mm]	350	200	64
N <sub>w</sub>	2	10	31
L [m]	0.7	2.0	1.98
ε <sub>w</sub> / ε <sub>0</sub>	1.19	0.91	0.64
σ <sub>w</sub> / σ <sub>0</sub>	1.21	1.01	1.31

のパラメータとして表 1 に示す値[9]を使用した。エミッタンスの低下により偏向電磁石からの放射光の輝度が数倍向上し、また適切なパラメータの選択により 1.0GeV 運転時のウィグラー光は現在の 1.5GeV シンクロトロン光よりも十分に高強度でより高エネルギーな光子が得られる事がわかる。

自然エミッタンスは放射減衰と放射励起とのバランスで決まり、ウィグラー放射によるエミッタンスとエネルギー広がりの変化は次式で表される[4]。

$$\frac{\epsilon_W}{\epsilon_0} = \frac{1 + I_5^W / I_5^0}{1 + I_2^W / I_2^0} \quad \frac{\sigma_{\epsilon W}^2}{\sigma_{\epsilon 0}^2} = \frac{1 + I_3^W / I_3^0}{1 + I_2^W / I_2^0} \quad (2)$$

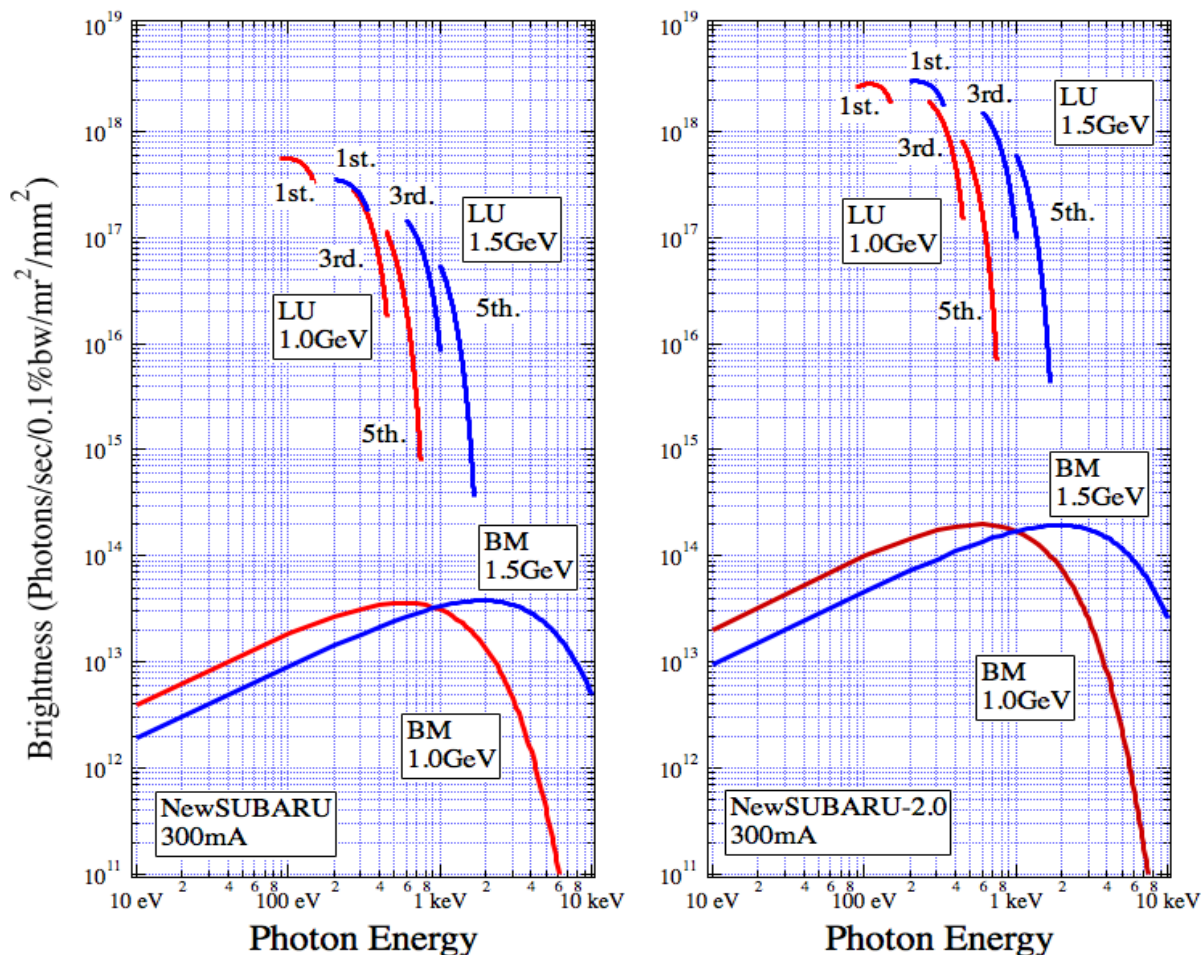


Figure 9: Brightness of LU radiation in NewSUBARU (left) and NewSUBARU-2.0 (right).

ここで  $I_2, I_3, I_5$  は radiation integral、添字  $0, w$  は偏向電磁石およびウィグラーそれぞれにおける積分を表す[4]。パラメータを良く選択した多極ウィグラーを採用することで、1.0GeV 運転時の高エネルギー光子の発生とダンピングの両方を満たすことが出来る。

#### 4.2 長尺アンジュレーター

現在の NewSUBARU 光源の最も大きな特徴は長い長直線部を活かした長尺アンジュレーターからの高輝度光であり、低エミッタンスリングの NewSUBARU-2.0 でも更に重要な役割を果たす事になる。図 9 に NewSUBARU および NewSUBARU-2.0 における長尺アンジュレーター光の輝度スペクトルを示す。低エミッタンス化の効果により1桁に近い輝度の向上が見られる。

#### 4.3 短尺アンジュレーター

短直線部でも同様に既存の短尺アンジュレーターを使う事が最も利用者に適していると考えられる。あるいは先に述べた多極ウィグラーの導入により高エネルギー光子の発生とダンピング効果による更なるエミッタンスの改善も別の選択肢としてありえる。

#### 4.4 コンプトン散乱ガンマ線

相対論的電子ビームとレーザー光との正面衝突によるコンプトン散乱ガンマ線の発生とその利用も現在の NewSUBARU の特色の一つである。効率的なガンマ線光子の生成には電子ビームとレーザー光の overlap factor が1である事、つまり直線部中央の衝突点で電子ビームとレーザー光のウェストがほぼ等しい状態が望ましい。しかし、長直線部を用いている現状ではレーザー光源から直線部中央までの距離が長いために必ずしも最適な状態ではない。この問題を解決するために NewSUBARU-2.0 ではコンプトン散乱ガンマ線用ビームラインを短直線部へ移動することが望ましい。

蓄積ビームエネルギーに関しては、実験的にガンマ線エネルギーを連続的に可変させたいが、レーザー波長の選択はある程度限られるため、現在と同じく 0.5 から 1.5GeV 程度の間で可変できることが望ましい。

#### 4.5 Phase-Merging Enhanced Harmonic Generation FEL

NewSUBARU-2.0 の長直線部を活用するもう一つの選択肢は Phase-Merging Enhanced Harmonic Generation (PEHG) FEL による高出力 EUV 光源の開発である。水平方向に K パラメータが線型に変化する Transverse Gradient Undulator (TGU) を用いる PEHG

はシード型 FEL の一種で、強い高次高調波成分を持つマイクロバンチを効率的に形成できることが理論的に示された[10]。また MW 級の EUV リソグラフィ光源として蓄積リングを用いた PEHG FEL スキームが提案された[11]。

PEHG の概要を図 10 に示す。Dogleg1 を通過した電子の水平方向位置はエネルギーに従って変位する。アンジュレーター内でレーザー光によりエネルギー変調を受けた電子は水平方向に磁場の強度が変化する TGU で位相が merge する。シケイン通過後に密度変調が起こり、バンチングファクターはシード光波長の高次高調波成分を持ち、radiator からハイパワー放射が得られる。

現行の NewSUBARU リングでも PEHG FEL の可能性を検討した[12]。PEHG によるバンチングの原理上、水平方向のエミッタンス、ビームサイズはある程度小さい必要があるが、NewSUBARU の場合は水平方向エミッタンスが大きいため、高次のバンチングファクターがあまり大きく出来ない問題があった。一方、NewSUBARU-2.0 ではエミッタンスが小さいために厳しい条件は緩和される。270nm のシード光を用いた時、20 次高調波が EUV リソグラフィに必要な 13.5nm に相当する。図 11 に典型的なパラメータを用いた時の radiator 部でのバンチングファクターを示す。20 次高調波のバンチングファクターは 0.09 程度であった[13]。

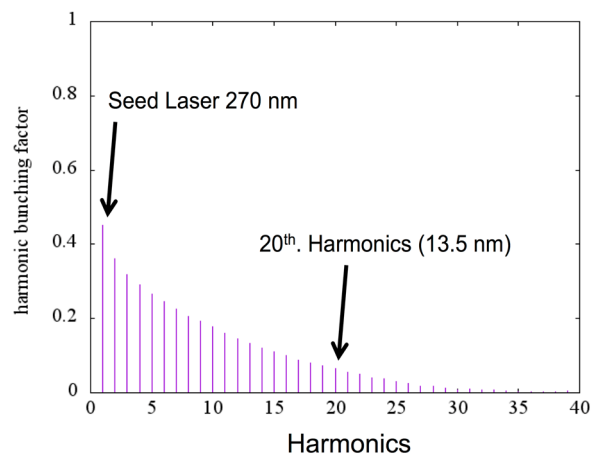


Figure 11: Harmonic bunching factor of PEHG process in the case of NewSUBARU-2.0. If the seed laser wavelength is 270 nm, the 20<sup>th</sup> harmonics corresponds to 13.5 nm that is needed for the EUV lithography.

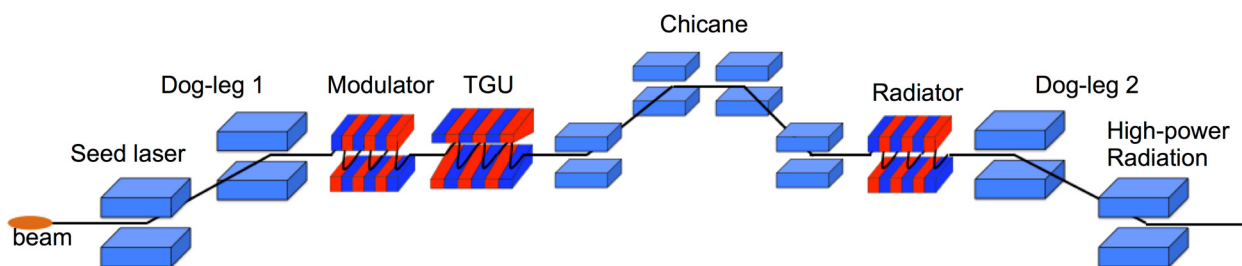


Figure 10: Layout of the Phase-Merging Enhanced Harmonic Generation (PEHG) scheme.

## 5. まとめ

NewSUBARU 光源加速器の将来のアップグレードに向けて、低エミッタンスリング NewSUBARU-2.0 の検討を開始した。既設の建屋と遮蔽トンネルを出来るだけ流用せざるを得ないため、リングの大きさや形状はほぼ現在のままとする。そのような条件の下でラティス計算ツールを用いた計算の結果、TBA 型ラティスでの最小エミッタンスは 5.5nm-rad であった。QBA 型ラティスでは 2.2nm-rad であったが、機器の配置はかなり窮屈で相当な工夫が必要であろう。ダイナミックアパーチャー、クロマティシティ最適化、IBS 効果、ビーム寿命などの詳細な評価を現在行っている。

NewSUBARU-2.0 における偏向電磁石からのシンクロトロン放射やアンジュレーター光の輝度は現行リングに比べて一桁近く向上する。挿入光源の選択について、現状と今後の利用状況また加速器光源 R&D 等から検討した結果、図 12 に示すように 2 つの可能性を挙げる。一つは二台目の長尺アンジュレーター (LU2)、もう一つは PEHG FEL による高出力 EUV 光源の開発および並行して別のアンジュレーター (Middle long Undulator, MU) の使用である。表 2 に NewSUBARU および NewSUBARU-2.0 のリングの主要なパラメータを示す。

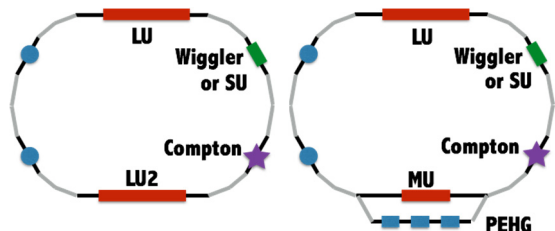


Figure 12: Proposed layouts of NewSUBARU-2.0. “LU2” and “MU” denote “2<sup>nd</sup> Long Undulator” and “Middle long Undulator”, respectively.

Table 2: Typical Parameters of NewSUBARU and NewSUBARU-2.0 Rings

	NewSUBARU	NewSUBARU-2.0
Circumference [m]	118	~118
Beam Energy [GeV]	0.5~1.5	0.5~1.5
Beam Current [mA]	500 (Max.) 300 (Top-up)	< 500 <300
Insertion devices	LU Compton SU	LU LU2/PEHG MPW/SU Compton
Emittance [nm-rad]	37	5.5 (TBA) 2.2 (QBA)

## 参考文献

- [1] A.Ando *et al.*, J. Synchrotron Rad., 5, 342-344 (1998).
- [2] <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS>
- [3] S.Hashimoto, “Upgrade plan toward the higher- brightness radiation source, NewSUBARU-2.0”, LASTI Annual Report 2016.
- [4] Handbook of Accelerator Physics and Engineering, Wu, Chao, M. Tigner.
- [5] <http://mad.web.cern.ch/mad/>
- [6] <https://wiki.classe.cornell.edu/ACC/ACL/OffsiteDoc>
- [7] M. Borland, "elegant: A Flexible aSDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation", Advanced Photon Source LS-287, September 2000.
- [8] A.Ando *et al.*, “Upgrade of NewSUBARU with Superconducting Magnets”, JJAP 46, p.6046-6050 (2007).
- [9] E.Levichev, “Review of Wiggler Parameters” Wiggle2005 workshop (2005).
- [10] Chao Feng, “Theoretical and Experimental Studies on Novel High-Gain Seeded Free-Electron Laser Schemes”, Springer Theses.
- [11] Chao Feng *et al.*, “Storage ring based PEHG FEL for EUV lithography”, High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions (EUV, HILAS, MICS) © 2016 OSA.
- [12] S. Miyamoto *et al.*, “A STUDY OF HIGH AVERAGE POWER EUV FREE ELECTRON LASER ON THE STORAGE RING” Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.1056-1059 (2016).
- [13] S. Hashimoto *et al.*, “Possibility of High-power EUV light by PEHG scheme at NewSUBARU-2.0”, LASTI Annual Report 2016.