

# ULTRA-LOW EMITTANCE LIGHT SOURCE STORAGE RING WITH SHORT AND NORMAL LENGTH STRAIGHT SECTIONS IN A CELL

Koji Tsumaki

JASRI/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyougo, 679-5198

## Abstract

We designed a ten-bend achromat cell. But since the number of straight sections of a ring consisting of ten-bend achromat cells is small, we have added a short straight section in a ten-bend cell by removing the septupole magnets and rearranging the quadrupole magnets which are placed in the center of a cell. We have designed two storage rings, with and without long straight sections, having two straight sections in a cell. The emittance of the storage ring with no long straight section reaches 69.7 pm by radiation damping of undulators. The brightness of the radiation from the 4.5 m length undulator placed in a normal straight section and that of from the 2 m length undulator placed in a short straight section are  $2.6 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) and  $1.3 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) at 1 Å wavelength with 200 mA beam current, respectively. The emittance of the storage ring having long straight sections becomes 49.5 pm with damping wigglers. The brightness of  $2.9 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) and the brightness of  $1.2 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) are obtained by the 4.5 m length undulator and 2 m length undulator, respectively. These results shows that we can get the bright radiation from a short length undulator placed in a dispersion section and we can construct many beamlines even a storage ring consisting of ten bend achromat cells.

## 通常の直線部に加えラティス中央に短直線部を設けた 放射光用低エミッタンスリングの検討

### 1. はじめに

第一世代の放射光リングの平均輝度を1とすると、第二世代では数百倍から数千倍、さらに光源が偏向電磁石からアンジュレータに代わった第三世代では数千万倍から数億倍となった。さらに高輝度、高コヒーレンス、短パルスを求めて第四世代のXFELが実現し、ERLも開発中である。これらは第三世代までの蓄積リングと異なりいずれも線形加速器をベースにしている。理由は蓄積リングではこれらの特性を持つ電子ビームは実現できないと考えられていたからである。しかし蓄積リングは、ビームの軌道安定性が良い、平均輝度が高い、多様なフィリングパターンが可能である、ビームラインの数が多く、技術的な完成度が高い、など多くの長所がある。そのため、蓄積リングで短パルスはともかく、超低エミッタンスのリングが出来れば、高輝度で空間コヒーレンスの高い放射光が可能になる。これらを目的として超低エミッタンスが検討され、10 bend achromat cell からなる34 pmの超低エミッタンスを持つリングが現実的なパラメータで可能であり<sup>[1]</sup>、平均輝度がERLや場合によってはXFELに匹敵することがわかった。

このラティスをSPring-8蓄積リングに適用したところ、83 pmの超低エミッタンスリングが可能であることがわかった<sup>[2]</sup>。しかしながら現在のSPring-8蓄積リングの直線部の数が4カ所であるの比べ、直線部の数が2カ所と少ないのが欠点である。そこでセル中央の六極電磁石を取り除き、四極電磁石を脇によせ、短い直線部を持つラティスを設計し、

特性を検討した。

設計したリングは、長直線部のない24セルのものと同様SPring-8と同じ4箇所の長直線部のあるリングの2種類である。それぞれについてダイナミックアパーチャ、得られる輝度などを検討したのでその結果について報告する。

### 2. 10 bend ラティス

エミッタンスは偏向電磁石の数の3乗に逆比例するため、低エミッタンスにするにはできるかぎり偏向電磁石の数を多くし、偏向電磁石中でビームを絞ってやれば良い。しかしビームを絞ると色収差が大きくなる上、偏向電磁石数が増すとディスパージョン関数が小さくなるため、色収差を補正する六極電磁石が強くなりリングの非線形性が増し、ダイナミックアパーチャが小さくなるという問題がある。そのためエミッタンスが小さくて、かつダイナミックアパーチャがそれなりにあるリングを現実的なパラメータで設計できるかがポイントになる。そのためには1セルあたりの偏向電磁石の数を出来る限り増やしてかつ偏向電磁石の中でビームを強力に絞り、エミッタンスを小さくするとともに、できるかぎり磁石強度の弱いリングにしてダイナミックアパーチャを大きくするという相矛盾した要求を満たさなければならぬ。図1にこれらの要求を満たした10 bend achromat cellとオプティカル関数を示す<sup>[1]</sup>。セルの長さは60 mで直線部の長さは6.56 mである。四極電磁石、六極電磁石のボア径は40 mmで磁場の強さはそれぞれ50 T/mと3000 T/m<sup>2</sup>を上限として磁石の長さを決めラティスを設計した。

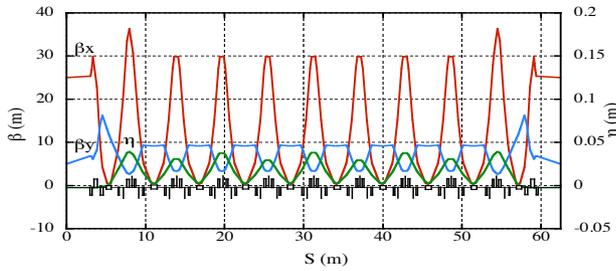


図 1 : 10 bend achromat cell とオプティカル関数

### 3. 長直線部を持たないリング

#### 3.1 ラティス

セル中央の偏向電磁石間の距離はもとのラティスでは 4.78 m で、この間に 3 個の六極電磁石と 4 個の四極電磁石がある。六極電磁石を取り除き、四極電磁石をわきよせただけでは十分な直線部の長さが得られないため、元の直線部の長さを 6.56 m から 6 m にして、0.56 m だけ短直線部に回し、短直線部の長さ 3 m を確保した。図 2 に 1 セルの構造とオプティカル関数を、表 1 に主なパラメータを示す。

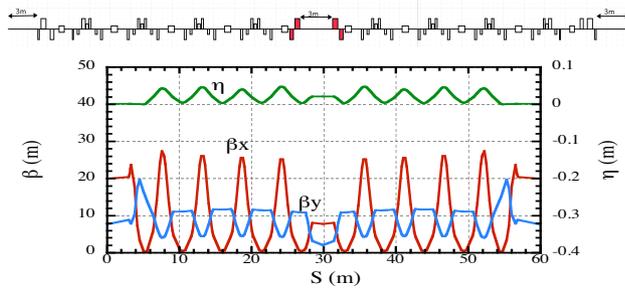


図 2 : 中央に短直線部を持つセルの磁石配置とオプティカル関数

表 1 : 蓄積リングの主なパラメータ

パラメータ		値
エネルギー	$E$	6 GeV
エミッタンス	$\epsilon_0$	85.5 pm
周長	$Lc$	1436 m
セル数	$Nc$	24
チューン	$\nu_x/\nu_y$	110.30 / 31.28
色収差	$\xi_x/\xi_y$	401 / 86
モーメントムコンパクション	$\alpha$	$1.6 \times 10^{-5}$
エネルギー幅	$\sigma_e/E$	$1.03 \times 10^{-3}$
RF 電圧	$Vrf$	8 MV
パンチ長	$\sigma_l$	1.46 mm / 4.87 pm
直線部長さ	$Ls$	6.0 m / 3.0 m

#### 3.2 ダイナミックアパーチャ

図 3 に直線部におけるダイナミックアパーチャを示す。改善前は色収差補正だけの場合、改善後はハーモニック補正により幾何収差も補正した場合を示す。ダイナミックアパーチャは 5 mm 程度あり低エミッタンスの電子ビームを入射するのに十分な大きさである。

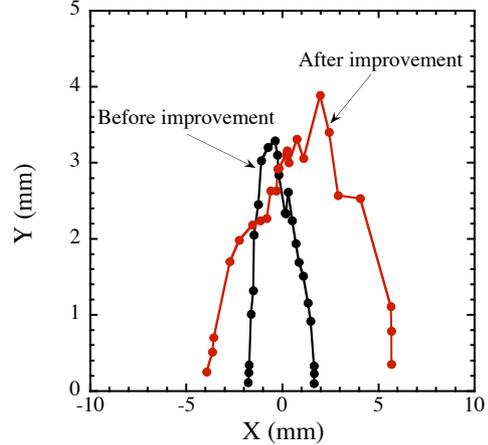


図 3 : 長直線部を持たないリングのダイナミックアパーチャ

#### 3.3 縦方向の安定性

低エミッタンスリングはモーメントムコンパクションファクターが  $1.6 \times 10^{-5}$  と小さく縦方向の安定領域が小さくなるおそれがある。そこで縦法の安定領域を計算した。結果を図 4 に示す。高次のモーメントムコンパクション<sup>[3]</sup>はシミュレーションプログラム cetra で計算したものを使用した<sup>[4]</sup>。図 3 (a) は最低次の  $\alpha_0$  だけ考慮した場合、図 3 (b) は  $\alpha_0$  から  $\alpha_4$  まで考慮した場合である。ただし、 $\alpha_0$  から  $\alpha_4$  までの値はそれぞれ次の通りである。 $1.6 \times 10^{-5}$ ,  $1.7 \times 10^{-4}$ ,  $-1.4 \times 10^{-3}$ ,  $-2.5 \times 10^{-2}$ ,  $2.2 \times 10^{-1}$ 。高次まで考慮するとポテンシャルの形は歪むが、“ $\alpha$  バケツ”にはならず RF バケツの形を保持している。

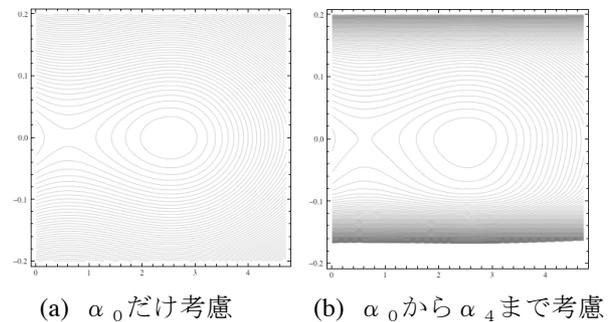


図 4 : 縦方向の安定性

#### 3.4 輝度

2 4 カ所の 6 m の直線部のうち 2 カ所を RF 空洞設置のために、1 カ所を入射に使用するとし、2 4 カ所の 3 m の短直線部のうち 1 カ所はモニターを設

置るとすると、6 m の直線部には 21 個のアンジュレータが、3 m の直線部には 23 個のアンジュレータが設置できる。アンジュレータパラメータ  $K$  を 1.34、周期長を 1.8 cm とするとアンジュレータによるエネルギーロス は 2.0 MeV となり、偏向電磁石によるエネルギーロス 4.6 MeV と合計して 6.6 MeV のエネルギーロスとなる。

6 m の直線部に周期長 1.8 cm 長さ 4.5 m のアンジュレータ ID1 を 21 個、3 m の直線部には周期長は同じく 1.8 cm で長さが 2.0 m のアンジュレータ ID2 を 23 個設置するとするとすべてのアンジュレータギャップを閉じると、エミッタンスは 85.5 pm から 69.7 pm に、エネルギー幅は 0.00103 から 0.00101 となる。表 2 にアンジュレータに関する主な項目とその値を、表 3 にエミッタンスとエネルギー幅をまとめて示す。表 2 と表 3 に示す条件で SPECTRA<sup>51</sup>を用いて、放射光の輝度を計算した。ただし電流は 200 mA を、カップリングは 0.2 % を仮定した。結果を図 5 と図 6 に示す。これより 4.5 m のアンジュレータからはダンピングなしで最大  $2.2 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)、ダンピングがある場合は  $2.6 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) の輝度が得られることがわかる。また短直線部の 2 m のアンジュレータからはダンピングのない場合  $1.2 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)、ダンピングがある場合  $1.3 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) の輝度が得られる。このことから、ディスページョンがあり長さの短い直線部からでも  $10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) 台の十分輝度の高い光が得られことがわかった。

表 2 : アンジュレータに関する主な項目とその値

パラメータ	ID1	ID2
長さ	4.5 m	2.0 m
周期長	1.8 cm	1.8 cm
個数	21	23
$\beta_x / \beta_y / \eta$	20.0 m / 7.8 m / 0 m	7.8 m / 2.1 m / 0.02 m

表 3 : エミッタンスとエネルギー幅

	アンジュレータなし	アンジュレータあり
エミッタンス $\epsilon_0$	85.5 pm	69.7 pm
エネルギー幅 $\Delta E/E$	0.00103	0.00101

## 4. 長直線部を持ったラティス

### 4.1 ラティス

SPring-8 蓄積リングのビームラインと全く同じ位置と同じ数のビームラインになるように、長直線部のあるリングを設計した。この場合もセル中央の偏向電磁石間の六極電磁石を取り除き、四極電磁石をわきよせ通常の長さの直線部に加え、短い直線部を持つようにラティスを設計した。オプティカル関

数を図 7 に、主なパラメータを表 4 に示す。

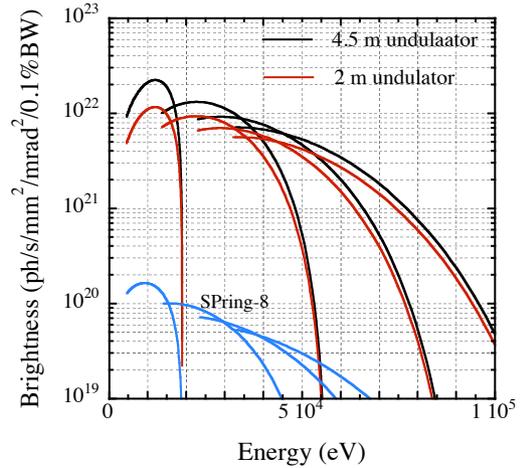


図 5 : ダンピングを考慮しない場合のアンジュレータからの放射光スペクトル

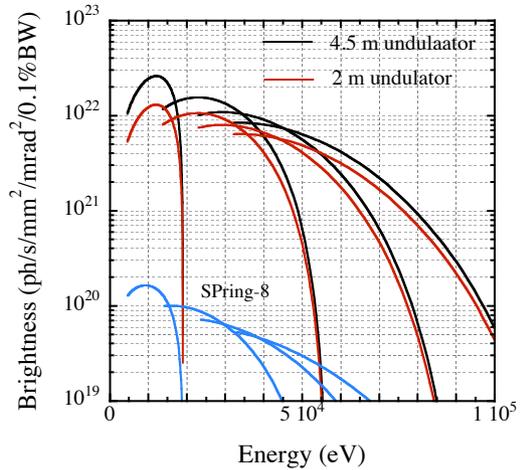


図 6 : ダンピングを考慮した場合のアンジュレータからの放射光スペクトル

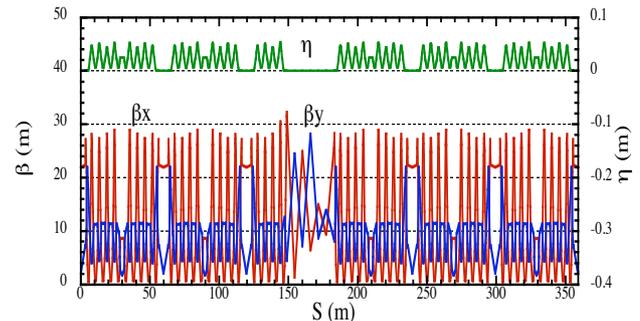


図 7 : 1/4 周分のオプティカル関数

表 4 : 長直線部を持つ蓄積リングの主なパラメータ

パラメータ		値
エネルギー	$E$	6 GeV
エミッタンス	$\varepsilon_0$	107.7 pm
周長	$Lc$	1436 m
セル数(10bend/5bend/長直線)	$Nc$	20 / 4 / 4
チューン	$\nu_x/\nu_y$	104.44 / 34.45
色収差	$\xi_x/\xi_y$	413 / 91
モーメントムコンパクション	$\alpha$	$1.7 \times 10^{-5}$
エネルギー幅	$\sigma_r/E$	$1.08 \times 10^{-3}$
RF 電圧	$Vrf$	16
バンチ長	$\sigma_l$	1.04 mm / 3.45 pm
直線部長さ	$Ls$	6.6 m / 2.5 m

#### 4.2 ダイナミックアパーチャ

図 8 にハーモニック補正前と補正による改善後のダイナミックアパーチャを示す。長直線のない場合に比べダイナミックアパーチャが小さく補正後もあまりアパーチャが大きくなっていない。まだ補正が十分でなくアパーチャ改善の余地があるのかも知れない。

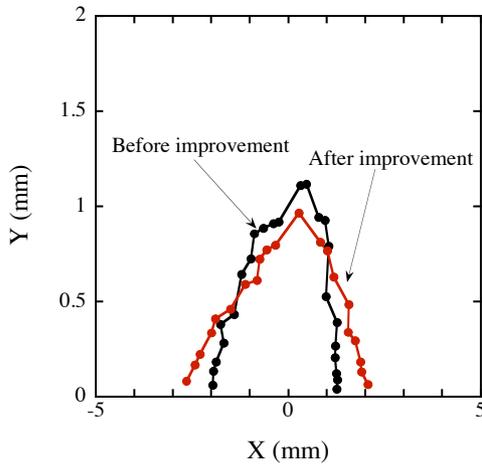
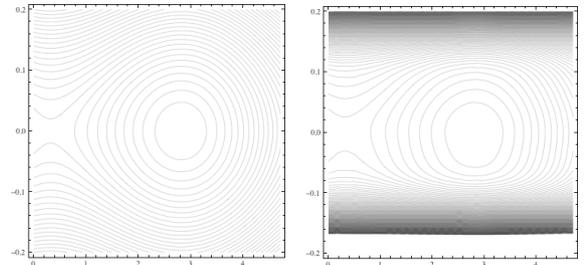


図 8 : 長直線部を持つリングのダイナミックアパーチャ

#### 4.3 縦方向の安定性

図 9 に縦方向の安定領域の計算結果を示す。図 9 (a)は最低次の  $\alpha_0$  だけ考慮した場合、図 9 (b)は  $\alpha_0$  から  $\alpha_4$  まで考慮した場合である。ただし、 $\alpha_0$  から  $\alpha_4$  までの値はそれぞれ次の通りである。 $1.7 \times 10^{-5}$ ,  $1.9 \times 10^{-4}$ ,  $-1.4 \times 10^{-3}$ ,  $-5.9 \times 10^{-2}$ ,  $6.2 \times 10^{-1}$ 。高次まで考慮すると長直線部を持たないリングと同じくポテンシャルの形は歪むが、RF バケットの形は保持している。



(a)  $\alpha_0$  だけ考慮 (b)  $\alpha_0$  から  $\alpha_4$  まで考慮

図 9 : 縦方向の安定性

#### 4.4 輝度

20 箇所通常長さの直線部のうち 3 箇所を RF のために、1 箇所を入射のために使用すると残り 16 箇所がアンジュレータ用を使用できる。また 20 箇所の短直線部のうち 1 箇所はビーム診断用とする。また長直線部には通常アンジュレータかダンピングウイグラーを置くものとする。16 箇所の通常直線部には、長さ 4.5 m 周期長 1.8 cm のアンジュレータを、19 箇所の短直線部には長さ 2 m 周期長 1.8 cm のアンジュレータを、4 箇所の長直線部には 1 直線部あたり 6 個の 4.5 m 長のアンジュレータかダンピングウイグラーを置くものとする。これらの主な数値を表 5 に、またこれらの挿入光源を入れた場合のエミッタンスとエネルギーを表 6 に示す。

偏向電磁石によるエネルギー損失は 5.0 MeV、直線部すべてにアンジュレータを置いた場合のエネルギー損失は 3.2 MeV、長直線部にウイグラーを、他はアンジュレータとした場合、ウイグラーによるエネルギー損失は 5.5 MeV、アンジュレータによるものは 1.6 MeV である。これよりエネルギー損失は最大 12.2 MeV となるため、RF 電圧は 16 MV とした。

図 10 と図 11 に電流 200 mA、カップリング 0.2% を仮定した時のダンピングを考慮しない場合と考慮した場合の放射光のスペクトルを示す。これよりダンピングなしとした場合でも 4.5 m のアンジュレータからは最大  $1.9 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)、ダンピングがある場合は  $2.9 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) の輝度が得られることがわかる。また短直線部の 2 m のアンジュレータからはダンピングのない場合  $0.95 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)、ダンピングがある場合  $1.2 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) の輝度が得られることが分かる。このことから、ディスパージョンがあり長さの短い直線部からでも長直線部を持たない時と同様に  $10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW) 台の十分輝度の高い光が得られことがわかる。

表 5 : アンジュレータおよびダンピングウイグラーに関する主な項目とその値

	ID1	ID2	ID3
長さ	4.5 m	2.0 m	4.5 m
周期長	1.8 cm	1.8 cm	5 cm
個数	16	19	24
$\beta_x / \beta_y$	21.9 m / 2.1 m	8.5m / 1.7 m	8 m- 17 m
$\eta$	0 m	0.02 m	0 m

表 6 : エミッタンスとエネルギー幅

	ID なし	ID1+ID2	ID1+ID2+ID3
エミッタンス $\epsilon_0$	107.7 pm	72.8 pm	49.5 pm
エネルギー幅 $\Delta E/E$	0.00108	0.00104	0.00121

### 5. まとめ

1セルの長さ60 m の10 bend セル中央の六極電磁石を取り除き、四極電磁石を両側によせて、短い直線部を持つラティスを設計した。設計は長直線部を持たない24回対象リングと4箇所長直線部を持つリングについて行ない、それぞれ自然エミッタンス85.5 pmと107.7 pmが得られた。短直線部の長さは約3 mで、この部分には約0.02 mのディスパージョンが存在する。通常の直線部には長さ4.5 mのアンジュレータを、短直線部には長さ2 mのアンジュレータをおき、長直線部を持つリングに対してはさらに長直線部にダンピングウイグラーを置くことを仮定すると、ダンピングにより、長直線部を持たないリングのエミッタンスは69.7 pm、直線部を持つリングのエミッタンスは49.5 pmとなることがわかった。

ビーム電流200 mA、カップリング0.2%を仮定し放射光の輝度を計算した。長直線部を持たないリングでは4.5 mのアンジュレータからは1Åで $2.6 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)の輝度をもつ放射光が得られ、短直線部の2 mのアンジュレータからは $1.3 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)の輝度の放射光が得られることがわかった。また長直線部を持つリングでは4.5 mのアンジュレータから1Åで $2.9 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)の輝度の放射光が得られ、短直線部の2 mのアンジュレータからは $1.2 \times 10^{22}$  (ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)の輝度の放射光が得られることがわかった。これより、ディスパージョンのある短い直線部でも十分高輝度な放射光が得られ、10 bend ラテオスの通常の長さの直線部の数が少ないという欠点が解消できることがわかった。

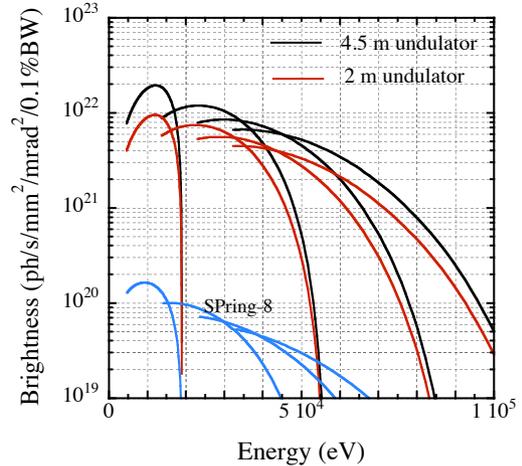


図 1 0 : ダンピングを考慮しない場合のアンジュレータからの放射光スペクトル

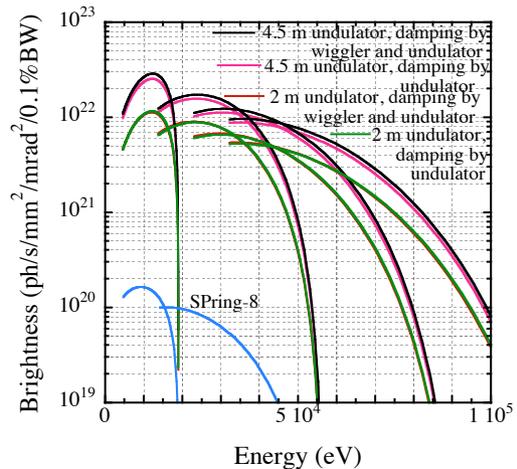


図 1 1 : ダンピングを考慮した場合のアンジュレータからの放射光スペクトル

### 参考文献

- [1] K. Tsumaki, N. Kumagai, "Very low emittance light source storage ring", Nucl. Instr. and Meth. A 565 (2006) 394.
- [2] K. Tsumaki, N. Kumagai, "NEXT GENERATION LIGHT SOURCE STORAGE RING AT SPring-8", EPAC'06, Edingburg, 2006, p.3362.
- [3] H. Tanaka et. al., "Aperturbative formulation of nonlinear dispersion for particle motion in storage rings", Nucl. Instr. and Meth. A 431 (1999) 396.
- [4] J. Schimizu et. al., "DEVELOPMENT OF A TRACKING AND ANALYSIS CODE FOR BEAM DYNAMICS IN SPring-8", The 13th Symposium on Accel. Sci. and Tech., Osaka, 2001, p.80.
- [5] T. Tanaka, <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/>