

# 次世代放射光光源と利用研究 ～ ERL とコヒーレンスを中心として ～

物質構造科学研究所 平野馨一

## 1. はじめに

現在、世界各地で次世代の放射光光源の計画が精力的に進められているが、それらの計画は大きく分けるとX線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser: X-FEL) とエネルギー回収型ライナック (Energy Recovery Linac: ERL) の二つに分類される。XFEL は電子ビームを長尺のアンジュレーターの中に通すことによってレーザー発振させるものであり、たとえば SLAC の LCLS 計画 (米国)、DESY の TESLA 計画 (ドイツ)、SPring-8 の SCSS 計画 (日本) などが有名である。他方 ERL では、インジェクターからの電子ビームを超伝導ライナックで加速し、周回リングを一周させた後、超伝導ライナックで減速して廃棄する。電子ビームを減速する際に回収したエネルギーは次の電子ビームを加速するのに利用されるため、「エネルギー回収型 (Energy Recovery)」という名称がつけられている。ERL の計画としては CHESS の ERL 計画 (米国)、NSLS の PERL 計画 (米国)、LBNL の Recirculating Linac 計画 (米国)、Erlangen Synchrotron Light Source の ERL 計画 (ドイツ) などがあるが、特に進んでいるのが CHESS の計画である。

ここ数年、Photon Factory (PF) でも将来計画の検討がなされてきたが、このような世界的状況を考えると、「XFEL と ERL のどちらを新光源として選ぶべきか？」ということがまず問題になってくる。この問題で特に考慮すべきことは、共同利用研究機関としての PF の使命である。現在 PF には 50 本以上の実験ステーションがあって多彩な研究が行われているが、新光源は少なくとも現在の研究活動の水準を保てるだけの capacity を持っていないなければならない。この観点から XFEL と ERL を比較すると、ビームラインを 10 本程度しか建設できない XFEL よりも、リング部に多数のビームラインを設置できる ERL の方が、PF の新光源としてふさわしいことになる。そこで以下では、ERL の特徴と利用研究について概観することにする。

## 2. ERL で得られる光の特徴

これまでの放射光光源では電子ビームが蓄積リングの中を何回も周回するため、ビームの軌道がぼけてエミッタンスが大きくなるという問題があった。これに対して ERL では、電子ビームはリング内を一回あるいは数回しか回らないため、ビーム軌道のぼけが小さくなってエミッタンスが小さくなるという特徴がある。

まず、longitudinal なエミッタンスが小さくなることから、短パルス光が得られるようになる。現在、PF では約 100ps、SPring-8 では約 30ps というパルス光が得られているが、ERL では 100fs ~ 数 ps の短パルス光が得られるようになる。

次に、transverse なエミッタンスが小さくなる。たとえば CHESS の ERL 計画では、

High Coherence Mode の場合、 $x \sim y \sim 15 \text{ pmrad}$  程度である。この値を SPring-8 の  $x \sim 6 \text{ nmrad}$ 、 $y \sim 5 \text{ pmrad}$  という値と比較すると、 $y$  は約 3 倍の大きさであるが  $x$  は約 1/400 の大きさである。エミッタンスが小さくなることから、輝度が数十倍向上し、コヒーレンスも向上することになる。

## 2.1 空間的コヒーレンス

空間的にコヒーレントな角度幅は  $\delta\theta \approx \lambda/2d$  という式で与えられる。ここで  $\lambda$  は波長、 $d$  は光源のサイズである。ERL では光源のサイズが小さくなるため、空間的コヒーレンスが向上する。例として CHESS-ERL の High Coherence Mode の場合（光源サイズは水平・垂直両方向とも  $25 \mu\text{m}$ ）について  $\delta\theta$  を計算すると、波長  $0.15 \text{ nm}$  の時、水平・垂直両方向とも約  $3 \mu\text{rad}$  になる。光の発散角は水平・垂直両方向とも約  $7 \mu\text{rad}$  なので、コヒーレント成分の割合（Coherent Fraction）は約 20%となる。同様にして SPring-8 の Coherent Fraction を見積もると、波長  $0.15 \text{ nm}$  で約 0.15%である。このことから、ERL では第三世代の放射光よりも Coherent Fraction が約二桁高くなることがわかる。

## 2.2 時間的コヒーレンス

時間的なコヒーレント長は  $l_c \approx \lambda^2/\Delta\lambda$  という式で与えられる。ここで  $\Delta\lambda$  は波長広がりである。またコヒーレント時間  $t_c$  は、光が  $l_c$  の距離を進むのに要する時間として定義される。時間的にコヒーレントな光の割合は、パルスの時間幅を  $\tau$  とすると  $t_c/\tau$  で与えられる。放射光の場合、コヒーレント長  $l_c$  はもっぱら分光器の性能によって決まるので、XFEL や ERL のような次世代の放射光光源ができて大して改善されないと考えられる。

## 2.3 光子縮重度

光子縮重度は「一つのパルスの中に含まれる、空間的にも時間的にもコヒーレントな光子の数」と定義され、次式で与えられる。

$$\delta_D \approx \frac{F}{f} P_c \frac{t_c}{\tau}$$

ここで  $F$  はフラックス、 $f$  は周波数、 $P_c$  は空間的にコヒーレントな成分の割合、 $t_c$  はコヒーレント時間、 $\tau$  はパルスの時間幅である（ $t_c/\tau$  が時間的にコヒーレントな成分の割合である）。この式から CHESS-ERL の High Coherence Mode の場合について光子縮重度を見積もると、波長  $0.15 \text{ nm}$  で約 380 となる。ちなみに SPring-8 の  $25 \text{ m}$  Undulator では、同じ波長で約 0.5 である。

## 2.4 光学系などに関する検討課題

以上のように ERL には様々な優れた特徴があるが、光源でせっかく良い光が得られても、ビームライン光学系などでそれを劣化させてしまっては台無しである。そこで、ビームラ

イン光学系などに関してもあらかじめよく検討しておく必要がある。たとえば、熱負荷対策、パルス制御、集光素子・光学系、コヒーレンス保存などの問題に取り組む必要がある[1]。

### 3. PF の ERL 計画

現在 PF では、物構研運営協議会の下放射光将来計画ワーキンググループで ERL 計画の検討を進めている。仕様についてはまだ確定していないが、表 1 のような案が出されている。図 1 は表 1 の仕様にしたがって設計したラティスの例である。

PF-ERL Main Parameters

Beam Energy	2.5 - 5.0 (GeV)
Injection Energy	10 (MeV)
Circumference	1253 (m)
Beam Current	~100 (mA)
Normalized Emittance	~0.1 ( $\mu\text{mrad}$ )
Horizontal Emittance	~10.0 (pmrad) at 5.0 GeV
Vertical Emittance	~10.0 (pmrad) at 5.0 GeV
Energy Spread	~ $5 \times 10^{-5}$
Bunch Length	1 (ps) ~ 100 (fs)
RF Frequency	1.3 (GHz)
ACC. Gradient	~20 (MV/m)
Long Undulator	200 (m) x 1
Middle Undulator	30 (m) x 4
Short Undulator	5 (m) x 12

表 1 PF-ERL の仕様案 (2002 年 10 月現在)

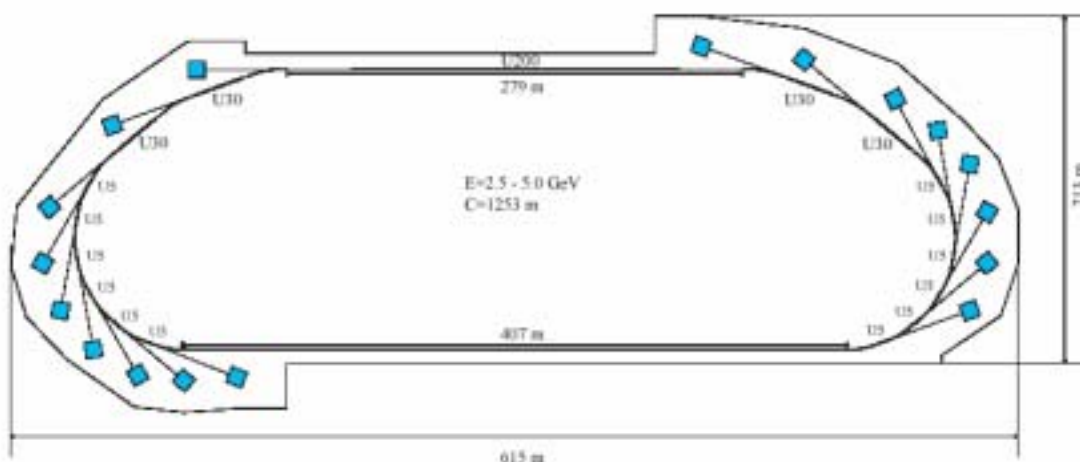


図 1 PF-ERL のラティスの案 (2002 年 10 月現在、PF 小林幸則氏による)

表 1 の数値をベースにして計算した輝度、フラックスなどを図 2 に示す。

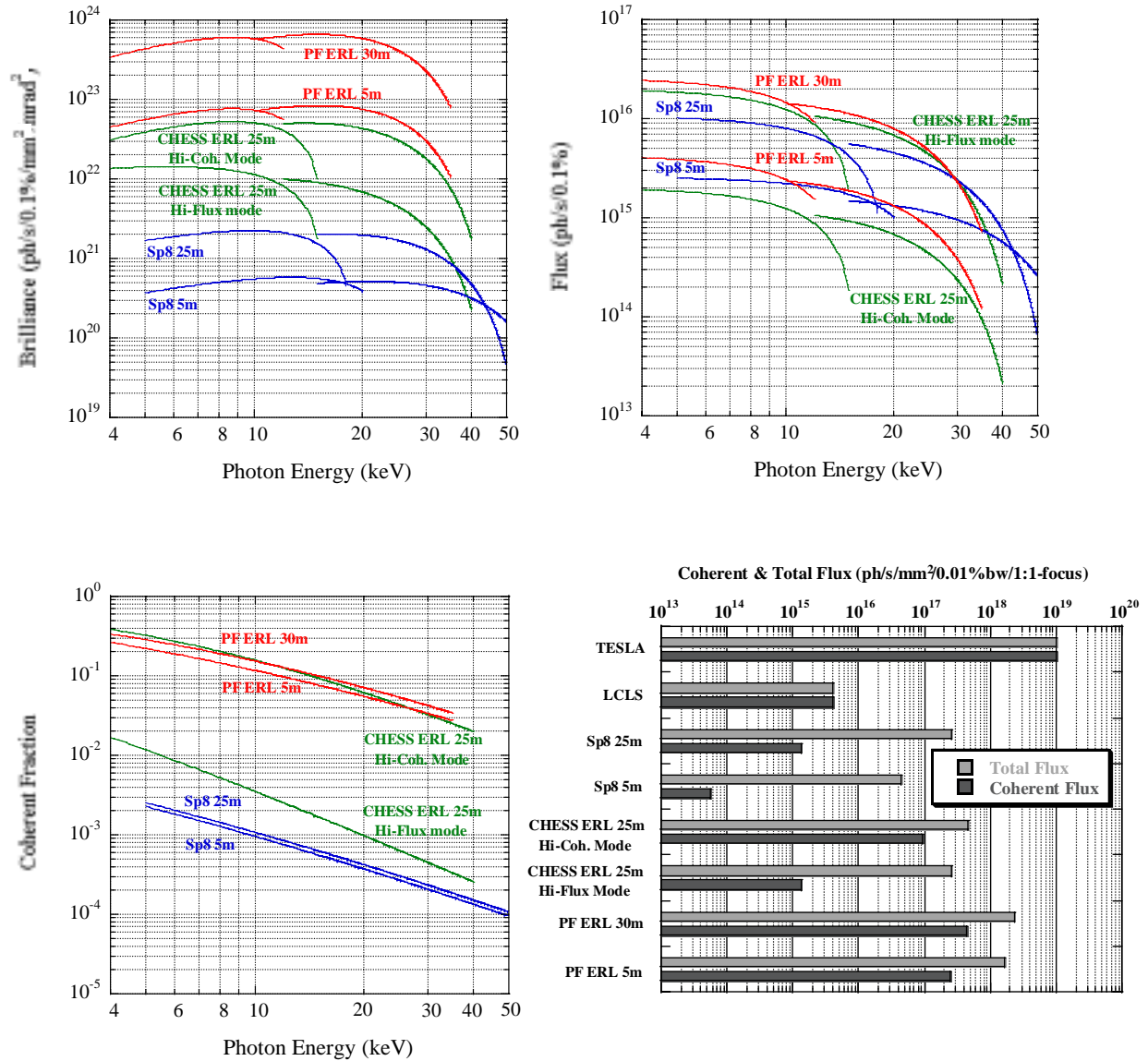


図 2 PF-ERL で得られる光の輝度、フラックスなどの計算例

ここでは PF-ERL のパラメーターを、 $E = 5 \text{ GeV}$ 、 $I = 100 \text{ mA}$ 、 $x = y = 10 \text{ pmrad}$  とした。30m-Undulator のパラメーターは、 $u = 1.6 \text{ cm}$ 、 $N = 1875$ 、 $x = y = 20\text{m}$ 、5m-Undulator のパラメーターは、 $u = 1.6 \text{ cm}$ 、 $N = 312$ 、 $x = y = 5\text{m}$  である。なお、PF-ERL のパラメーターはまだ確定しておらず、ここに挙げた値は目標値である。

#### 4. ERL の利用研究

ERL の利用研究については、すでにレポートが数件出版されており[2,3]、国際的なワークショップも数回開催されている[4,5]。また、XFEL の利用研究に関する資料[6,7]もたいへん参考になる。これらの資料から、ERL の利用研究として図3のような方向性が見えてくる。PF でも ERL の利用研究を検討しているところであり、その詳細については近々デザインレポート（仮称）で紹介される予定である。

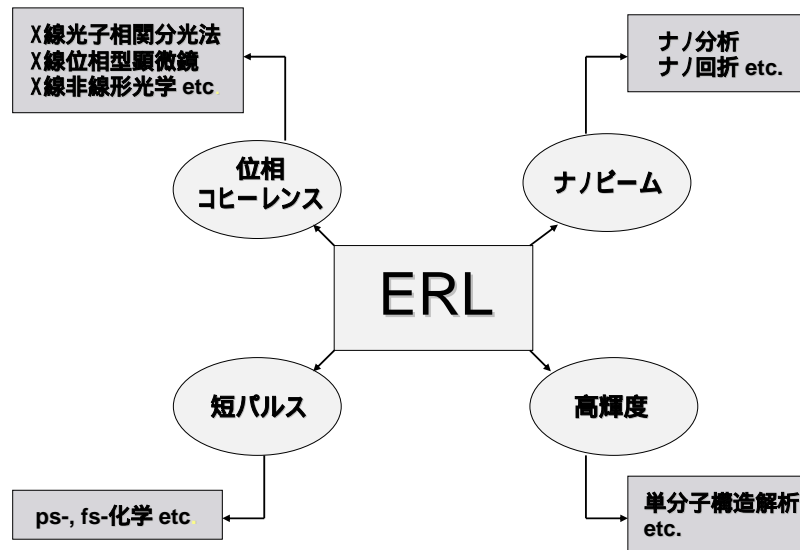


図3 ERL 利用研究の方向性

#### 参考文献

- [1] 平野馨一：2002年9月PFセミナー「次世代光源とX線光学素子 初級編」
- [2] “*Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac (ERL) Synchrotron Light Source at Cornell University*” (Sol M. Gruner & Maury Tigner, eds., Cornell University).
- [3] S. Gruner, D. Bilderback and M. Tigner : “*Synchrotron Radiation Sources for the Future*” (Cornell University, November 2000).
- [4] “*X-ray Science Workshop*” (Cornell University, December 2000).
- [5] SRI2001 Workshop “*Energy Recovery Linac Sources of Synchrotron Radiation*” (August 2001)
- [6] “*LCLS The First Experiments*” (SLAC, September 2000)
- [7] “*TESLA Technical Design Report Part V*” (G. Materlik Th. Tschentscher, eds., March 2001).