

動向

Photon Factory の将来計画について
—ERL に基づく新光源の検討—

飯田厚夫 (高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所*)

諏訪田剛 (高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設)

1. PF 将来計画の背景と経緯

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・放射光研究施設 (Photon Factory = PF) の PF2.5 GeV リングは1982年の運転開始以来、2度にわたる改造を行いエミッタンスも建設初期の約300 nmrad から36 nmrad に低下させてきた。ここ数年の内には直線部増強計画を実現し、挿入光源の高性能化とともにミニポールアンジュレータの設置が可能になる予定である^{1,2)}。また高エネルギー実験用の入射リングであった PF-AR を1986年からは放射光実験に利用し、その後専用化および部分的な高度化を行っている。このような努力と永年にわたる極めて安定な運転実績により、PF は物質科学や生命科学分野の放射光利用研究に大きな貢献をしてきた。しかし将来的に見ると輝度および挿入光源の数や性能などにおいて、高度化したユーザーの要求に長期間にわたって答えていくことには限界があると考えられる。一方世界的な放射光科学の視野に立てば、X線 FEL などを目指した第4世代放射光の構想^{3,4)}が実現に向けて着実な進展を見せ、また新第3世代と呼ばれる2~4 GeV クラスの汎用性の高い蓄積リングの計画・建設⁵⁾が行われている。このような中で、PF のこれまでの実績を継承し今後の放射光科学の発展に貢献することが PF に期待されている役割と思われる。

PF ではこのような観点から将来計画案を1990年代後半より検討してきた。4 GeV の放射光蓄積リングを基にした PF II が提案され PF シンポジウムでも将来計画についての議論が行われた⁶⁾。一方、KEK における大型プロジェクト計画との関係から予想される次期光源の稼働時期や国内における SPring-8 の順調な稼働、国内外における放射光源計画の流れの状況などを勘案し、将来計画の見直しを行った。その結果、最近そのユニークな特徴から注目を集めている ERL (Energy Recovery Linac エネルギー回収型ライナック)⁷⁻⁹⁾を将来の放射光光源候補として検討することとした。ERL に基づく新光源施設では、次章で述べる高輝度・短パルスなどの際だったハード的な特徴により先進的な放射光科学が推進されると同時に、広範な放射光利用研究への機会提供も引き続き可能になると期待され、先進性と汎用性を併せ持った施設として注目されてい

る。この検討のため、施設内の検討グループによる作業を進展させ、物質構造科学研究所運営協議委員会の下に設置されたワーキンググループにより検討作業が行われ、平成14年度末 (2003年3月) に検討報告書「放射光将来計画検討報告—ERL 光源と利用研究—」がまとめられた¹⁰⁾。本稿では、この報告書にもとづき、ERL 光源の検討の現状を紹介する。なお上記報告書をまとめるに当たっては PF ユーザーのみならず、国内の放射光科学に携わる多くの関係者の方々の協力を得ている。

2. ERL 光源

現在、電子蓄積リングを基盤加速器とした多数の放射光施設が稼働している。このような施設の放射光の性質は、リングのエネルギー及びビーム光学により決まる電子ビームの性質 (平衡状態) により決まってしまう。一方、ERL を基盤とする放射光源の場合は、原理的には平衡状態という概念に縛られることなく、究極の (回折限界) エミッタンス、極短パルスを有する放射光を実現可能であると考えられている。

a) ERL の原理と特徴

ERL の基本概念図を Fig. 1 に示す。ERL は、大きく分けて主線型加速器 (主加速器) と周回部 (放射光発生部) から構成される。電子銃で生成された電子ビームは入射部で比較的低いエネルギーまで加速され主加速器に入り高エネルギーまで加速される (加速ビーム)。加速ビームは、主加速器を出て周回部へと輸送され放射光を発生した後再び主加速器に帰還する。このとき、加速ビームを180度ずれた RF 位相に乗せ、逆に主加速器の出口まで減速させ減速部でさらに低エネルギーまで減速させた後ダンプへと捨てる。このように ERL では、基本的に、電子ビームは1度周回するだけで次々に新しいビームが主加速器に入射されるスキームをとる。主加速器では、加速減速ビームが同時に存在することになり、減速ビームから回収したエネルギーを次々と入射されるビームの加速エネルギーに使えるので、非常にエネルギー効率の高い (経済的) 加速器が実現できることになる。

* 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
TEL: 029-864-5634 FAX: 029-864-2801 E-mail: atsuo.iida@kek.jp

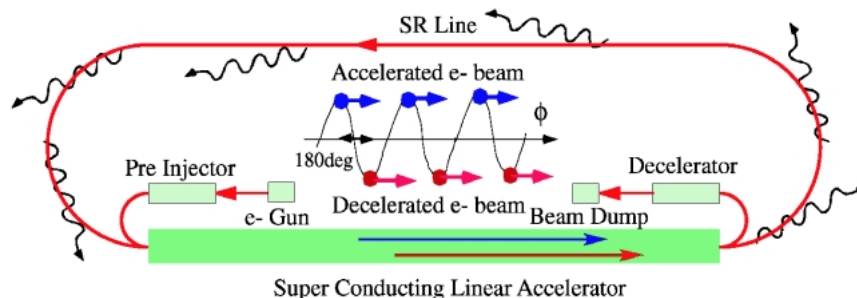


Figure 1. Conceptual accelerating scheme of an energy recovery linac (ERL).

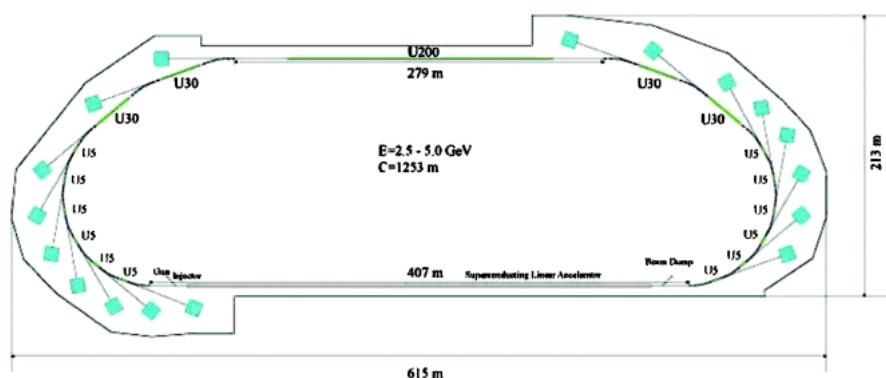


Figure 2. Design layout of the 5-GeV KEK-ERL.

b) KEK-ERL の計画

Fig. 2 に KEK における次期放射光源全体図と Table 1 にその主要パラメータを示す。アンジュレータからの基本モード放射光で 1 \AA の X 線利用が可能のように約 400 m 長の超伝導線型加速器を用いて最大加速エネルギーを 5 GeV まで可能とする。計画第 1 期では、電子エネルギーを 2.5 GeV とし、第 2 期では最大 5 GeV まで増強できるものとしている。放射光ビームラインは、長尺アンジュレータ (200 m~100 m 級) 1~2 本、中尺 (30 m 級) 4 本、短尺 (5 m 級) 12 本が配置できるようにする。偏向電磁石部も原理的には利用できる。

海外では、コーネル大学、ブルックヘブン研究所、ローレンスバークレー研究所、ジェファーソン研究所等^{7,8)}が ERL の実現に向けて精力的に R & D を推進している。中でも、ジェファーソン研究所⁹⁾は、高エネルギー電子加速器 CEBAF を使った 1 GeV / 80 μA 電子ビームのエネルギー回収実証試験を報告し ERL の原理実証を進めている。数 GeV 級の ERL の実現には開発要素が数多く、ここに上げたパラメータは現段階での目標値にすぎない。これを実現するために、KEK では、100~300 MeV 程度の試験加速器の設計検討を精力的に進めている。次期放射光源の実現に向けて試験加速器による早期の実証試験を行う必要がある。

Table 1. KEK-ERL Main parameter List

Beam Energy	2.5~5.0 GeV
Injection Energy	10 MeV
Circumference Length	1253 m
Maximum Current	100 mA
Normalized Transverse Emittance	0.1 mm•mrad
Energy Spread (rms)	5×10^{-5}
Bunch Length (rms)	1~0.1 ps
Accelerating Frequency	1.3 GHz
Accelerating Gradient	10~20 MV/m

3. ERL 利用研究

ERL 光源から得られる放射光の際立った特徴は、サブピコ秒のパルス特性、高いコヒーレンス度、微小ビームによるナノビームの実現である。ERL 放射光により新しく拓ける先端的研究の展望を得るために、これらの特性に密接にかかわる研究テーマを検討した。また ERL 光源からの放射光の汎用的な利用に関する展望や新しい装置技術についても検討を行った。

a) 短パルス特性

ERL 光源からの放射光の最も際立った特徴の一つがサブピコ秒のパルス幅が期待されるパルス特性であり、物質のダイナミクス研究に新たな世界を切り開くものと期待さ

れる。レーザーポンプ・放射光プローブ実験により、近年注目を集めている「光誘起構造相転移」における初期過程の研究やパルス圧力場中での結晶構造緩和ダイナミクスの研究が興味深い。これらは既に X 線を用いた研究が開始されているが、ERL によって実現されるサブピコ秒 X 線パルスを用いることにより今後の更なる進展が期待されている分野である。また固体表面のナノスケール領域のサブピコ秒ダイナミクスや強光子場中での分子ダイナミクスの研究は、今後新たに切り拓かれる放射光科学の分野と期待される野心的なテーマである。

b) X 線の位相やコヒーレンスを利用する研究

この分野は、放射光利用により現在既に活発な研究が行われている。X 線光子相関分光法、X 線コヒーレント光学、X 線位相型顕微鏡、オーバーサンプリング法による物質の構造解析について現状と展望を検討した。X 線光子相関分光法は物質のミクロな動的揺らぎが測定できる方法として精力的に研究されている。ERL によるコヒーレント光成分の増加により、その適応領域と対象が大幅に広がることが期待されている。X 線コヒーレント光学では光源性能の向上に刺激され新規なアイデアが出されている。オーバーサンプリング法は、構造解析にかかわる多くの分野から熱い視線が寄せられている。構造生物学への応用が視野に入っており、極めて注目すべきものである。

c) マイクロビームからナノビームへ

マイクロビーム利用も放射光利用により始めて実用化され、また逆に放射光を特徴付ける手法である。ERL 超高輝度光源からの円形ビームと今後の集光光学素子の改良により 10 nm レベルのビームサイズが得られると考えられる。ナノ領域の構造解析・化学状態解明・ナノテクノロジーデバイスへの応用などが視野に入り、究極には単分子構造解析の手段を提供することとなる。

d) その他の検討

今後の放射光利用研究を検討する上で重点利用研究分野の一つである構造生物学についても ERL 計画との関係について検討した。単分子構造解析と極微小結晶構造解析が今後の技術的挑戦課題であり、結晶化が困難な多くの対象がこの方法の恩恵をこうむる。

ERL 光源は汎用的な光源としても利用可能な点が、次期放射光源として注目されている理由の一つである。利用研究の展開の動向について検討を行った。更にこれらの先進的放射光利用研究を支える放射光基盤技術として、光学

系・検出系および新施設建設にかかわるエンジニアリングの課題についても検討を行った。

以上に述べた研究の展望は PF 内外でこれまで行われたいくつかのシンポジウム・企画・研究会、また PF ユーザーグループからの提案にもとづいた報告書作成時の検討結果であるので、今後の更なる深化を期待している。

4. PF 将来計画に向けての課題

PF の将来計画は、中・長期的な放射光科学の動向を見据えて策定すると同時に、大型施設にかかわる予算の動向をも視野に入れる必要があり、柔軟に対応する必要がある。今回の報告書ではその流れの中で ERL の可能性を検討した。しかし ERL 加速器の具体的なデザインの策定にはいたっていない。今後 ERL 計画を将来計画として具体化するために必要と思われる検討事項を以下にまとめる。

ERL が有力な放射光の次期光源として真剣な検討の対象になり始めたのは世界的に見てもここ 3-4 年のことである。ERL の先進性と汎用性に関する見通しを技術的に得る必要がある。この意味で、現在加速器研究施設と PF が共同で提案している「原理実証機」の実現が最優先課題である。一方放射光将来計画は、当然放射光科学の将来計画である。放射光利用研究者にとって十分魅力的であるのみならず、放射光関係者以外にも説得力のある研究計画の策定を進める必要がある。このためにはユーザーグループと継続的かつ広範な協力関係を構築する必要があり、また SPring-8 との協力関係も不可欠である。さらにより広くは行政当局あるいは社会の理解と支援を得られるような努力を行う必要もあると考えられている。

参考文献

- 1) 小林幸則 : *Photon Factory News* **18**(2), 17 (2000).
- 2) 野村昌治 : *Photon Factory News* **19**(3), 8 (2001).
- 3) <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/LCLS/>
- 4) <http://tesla.desy.de/>
- 5) 例えば DIAMOND 計画 (英国)
<http://www.diamond.ac.uk/>
- 6) 加藤正博, 土屋公夫 : *Photon Factory News* **17**(1), 20 (1999).
- 7) 代表的なコーネル大学の計画 <http://erl.chess.cornell.edu/>
- 8) *Physics Today* **55**(3), 23 (2002).
- 9) <http://www.jlab.org/FEL/feldescrip.html>
- 10) 報告書請求先 : 物質構造科学研究所・放射光研究施設・秘書室。または以下の URL を参照。
http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/erl/index.html