

# リング型光源としての ERL の可能性

日本原子力研究所、羽島良一

## 1 はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) を用いた次世代放射光源の提案 [1][2][3] がなされて以来、光源研究者と放射光利用者の情報交流の場として、日本放射光学会は学会誌、年会 (企画講演) を通して大きな役割を果たしてきた。2004 年には「若手を中心としたワークショップ – 今後 30 年の未来像 –」において次世代放射光源の利用に関する活発な議論が展開され、2005 年に入ると「次世代光源検討特別委員会」が設置され、学会としての次世代放射光源 (ERL も含む) に対する考え方がまとめられようとしている。「放射光」というキーワードで幅広い分野の研究者が集う学会組織は世界的にもユニークであり、このユニークな組織が積極的にコミットすれば、日本の次世代放射光源が他国より一歩先んじることも可能になるはずである。本講演では、次世代光源のひとつである ERL について、これまでに語られてきた基本特性に加えて将来のアップグレードの可能性を述べ、将来可能となるサイエンスを展望する材料としたい。

## 2 ERL 放射光源の基本特性

ERL 放射光源の特徴は

- フェムト秒 X 線パルスを自在の繰り返し周波数で生成
- 硬 X 線領域で回折限界の低エミッタンス、その結果として、高いコヒーレンス、ナノメートルサイズへの集光
- 高いフラックス
- 超伝導加速器技術を最大限に利用した高い安定性 (極めて良好な空間、時間精度)

などであり、これらの特徴を生かした利用の展開が議論されているのは周知の通りである。

## 3 ERL 放射光源の拡張性

過去の放射光源の開発と利用の歴史を振り返ってみれば、建設された施設を当初性能のまま使い続けるのではなく、様々なアップグレード (機能拡張、性能向上) を継続的に行いながら競争力のある施設として 10 年、20 年と利用されてきた例を見ることができる。現在議論になっている次世代放射光源の場合にも、アップグレードの余地をあらかじめ担保した計画としておくことが望ましい。ERL 放射光源の場合について、前節で示した基本特性をベースにした将来可能なアップグレードを検討してみる。もちろん、現時点で将来の技術進展を全て見通すことは不可能であり、ここで示すのは拡張可能性のごく一部であることをお断りしておく。

**低エミッタンス化** リニアックのエミッタンスは電子源の初期エミッタンスとその後のエミッタンス増大の和で決まる。エミッタンス増大を抑制する方法はさまざま検討されており、究極的には初期エミッタンスの大小が直接反映されるようリニアックが実現するであろう。ERL 放射光源の電子源として候補に上がっている NEA-GaAs カソードの初期エミッタンスは電子の熱運動で決まるので、カソードの温度を下げることでエミッタンスを小さくすることが原理的に可能である。初期エミッタンスはカソード温度 (絶対温度) の  $1/2$  乗に比例するので、カソード温度を室温 (300 K) から液体窒素温度 (77 K) に下げることによって、エミッタンスを半分にできる計算となる。すでに液体窒素冷却の NEA-GaAs カソードが試作されており [4]、将来の可能性として十分に検討に値する。

**大電流化** ERL の大電流化により放射光のフラックスの増大も可能である。現在の基本設計 ( $\sim 100\text{mA}$ ) から、さらに電流を増やすために解決すべき技術課題は、(1) 大電流電子銃、(2) HOM (高次モード) の効率的な取り出し、(3) ビーム不安定性の抑制である。10 年単位の時間スケールで、これら技術にどのような進展が見られるか予想することはできないが、現時点ですでにアイデアが生まれている。例えば、ダイヤモンド

ド薄膜を用いたアンペア級電子源 [5]、新型 HOM カップラー [6]、パンチ毎フィードバックによるビーム安定化 [7] などである。

SASE-FEL の併設 ERL 光源の基本設計では、5-6 GeV のリニアックを 20 MV/m 程度の加速勾配で実現することを想定している。超伝導加速器の冷却に必要な冷凍機能力が加速勾配の 2 乗に比例する点を考慮して、全体のコスト (建設、運転) を最小にするような設計である。ところが、最新の超伝導加速器では、空洞の形状と表面処理に工夫をこらすことで、この値よりも遥かに大きな加速勾配が実現可能であることがわかっている。例えば、KEK では国際リニアコライダー用に 51 MV/m の加速空洞 (ICHIRO-cavity) を開発している [8]。このような最新の加速空洞を採用しておけば、6 GeV の ERL であってもパルス運転で冷凍機負荷を下げれば高い加速勾配の運転が可能になる。例えば加速勾配を 20 MV/m から 45 MV/m に上げれば、13.5 GeV の電子エネルギーが得られることになる。この電子ビームを使えば、SASE-XFEL の実現も可能となる。

アト秒 X 線パルス レーザー技術に基づく光源では、すでにアト秒の X 線パルスが得られつつある [9]。高エネルギー電子ビームに基づく光源 (放射光) でも、早晚、アト秒パルスの生成と利用が行われるようになるであろう。従来の放射光では、物質の量子状態の確率分布 (波動関数の絶対値の 2 乗) を見ていたにすぎないが、アト秒の X 線パルスを用いれば位相を含めた波動関数そのものを直接観測したり制御できるようになる。これは、波動関数の位相のゆらぎがアト秒の時間スケールであることに由来する。高エネルギー電子ビームを用いてアト秒 X 線パルスを生成する方法はすでにいくつかの提案がなされており [10][11]、今後とも斬新な提案が続くであろう。どのような手法を用いるにせよ、ERL の基本特性である「自在の繰り返し周波数」「高い安定性」が大きな利点となることは確実である。

#### 4 最後に

ERL は、第 3 世代放射光源で培われたリング型光源の経験と実績を引き継ぎ発展させるだけでなく、様々な新しい展開が将来的にわたり可能な装置である。多くの研究者がアイデアを出し合い議論を深めていくことを望む。

#### 参考文献

- [1] D.A. Kayran et al., “MARS - A project of the diffraction limited fourth generation X-ray source”, in Proc. 1998 Asian Particle Accelerator Conference (1998).
- [2] 羽島, 峰原, リニアック研究会 (2000).
- [3] D. Bilderback et al., Synchrotron Radiation News, vol. 14, No. 3, 12-21 (2001).
- [4] S. Pastuszka et al., J. Appl. Phys. 88, 6788 (2000).
- [5] I. Ben-Zvi et al., Proceedings of the 2004 FEL Conference, 355-358.
- [6] 梅森他, 加速器学会年会論文集, 311 (2005).
- [7] C. Tennant et al., Proc. Linac Conf. 2004.
- [8] K. Saito, First ILC Workshop (2004).
- [9] H.C. Kapteyn et al., Physics Today March 2005, 39.
- [10] A. Zholents and W.M. Fawley, Phys. Rev. Lett. 92, 224801 (2004).
- [11] P. Emma, Proc. EPAC-2004, 225.