

## STATUS OF ERL DEVELOPMENT AT JAEA (2007)

Ryoji Nagai<sup>1,A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>A)</sup>, Masaru Sawamura<sup>A)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kikuzawa<sup>A)</sup>, Hokuto Iijima<sup>A)</sup>, Eisuke Minehara<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup>Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

We are proposing energy-recovery linac (ERL) based photon sources, which are a next generation X-ray light-source, a  $\gamma$ -ray source for a radioactive waste management, and an EUV-FEL for a next generation lithography. Related R&D is in progress. In this paper, we summarize these proposed ERL photon sources and research activities.

## 原子力機構におけるERL開発の現状 (2007)

### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構、ERL光子源開発研究グループではこれまでに超伝導加速器、高出力自由電子レーザー(FEL)、エネルギー回収型リニアック(ERL)における先導的な研究開発を通じて、電子ビームを用いた光子源のポテンシャルを飛躍的に高めることに貢献してきた。高輝度と大電流の両立を可能とするERL技術は、テラヘルツからガンマ線まで、全てのエネルギー領域において、光子源の性能を革新的に高めることができることから、多くのユーザの期待を集めている。われわれは、これらERL型光子源の実現に向けて、その中核技術である高輝度大電流電子銃の開発を精力的に進めると同時に、ユーザと連携をとりながらERL光子源の設計研究を行っている。本稿ではこれら研究の現状について報告する。

### 2. ERL光子源の提案

ERLによって加速される電子ビームの性質はリニアックによって加速される電子ビームのそれであり、超短パルス、極低エミッタンスの電子ビームが生成可能である。さらに、超伝導加速器を用い電子ビームを減速・エネルギー回収することで蓄積リングのような大電流加速が可能となる。従って、電子ビームの一部を光子として取り出す目的の加速器としては最適の加速器であるといえる。

我々は、発生する光の波長領域毎に、ユーザの要求に応じていくつかのERL光子源を提案している。以下にそれぞれの特徴と現在までの研究の現状について述べる。

#### 2.1 次世代放射光源としてのERL

前述のERLの特徴を活かすことで、第3世代放射

光施設(SPring-8など)を超えるX線放射光源が実現できる。特にERLではこれまでの蓄積リング型放射光源では実現が困難であったフェムト秒および回折限界以下の低エミッタンスの電子ビームが生成可能であることからフェムト秒時間分解能および可干渉性を必要とする分野での利用が期待される。我々は、ERL-FEL開発で蓄えた超伝導リニアック技術を発展させて、ERL駆動型次世代X線放射光源の実現に至る開発計画を提案してきた<sup>[1]</sup>。現在はKEK、東大物性研、UVSOR、SPring-8との共同で実証機開発を進めている<sup>[2]</sup>。実証機では大強度テラヘルツ光、レーザコンプトンによるフェムト秒X線の発生と利用も検討している<sup>[3]</sup>。

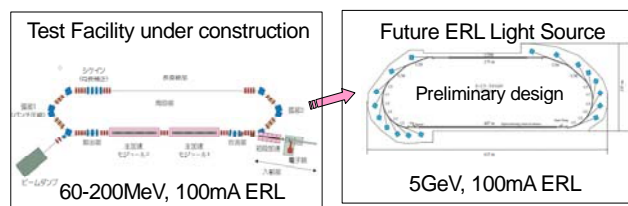


図1: ERL放射光源の開発

#### 2.2 放射性廃棄物処理・処分のための $\gamma$ 線源

放射性廃棄物の処理・処分は原子力の最優先課題であり、原子力機構が保有する廃棄物の処理・処分には2兆円の費用と80年の期間が必要であると試算されている。日本全体ではこの10倍を超える費用が必要である。米国核兵器工場の廃止措置において、X線放射光を使った研究成果が30兆円の費用削減をもたらした例<sup>[4]</sup>を見るように、最先端科学を援用することで廃棄物の処理処分にかかる費用を大きく削減できる可能性がある。我々は、ERL駆動型 $\gamma$ 線による光核共鳴散乱<sup>[5]</sup>を利用した放射性核種の非破壊定量を行い、廃棄物の効率的な処理・処分を実現する提案を行っている。

<sup>1</sup> E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

このためのERL駆動型 $\gamma$ 線源は図2に示すようなものであり、ERLとスーパーキャビティを用いコンプトン散乱により $\gamma$ 線を発生することで高効率、大強度の $\gamma$ 線を発生することができる。350MeV-ERL、モードロックファイバーレーザー、スーパーキャビティの技術を組み合わせることで、既存の $\gamma$ 線源を6-8桁上回るフラックス ( $1 \times 10^{10}/\text{sec/keV}$ ) が実現できると考える<sup>[5]</sup>。

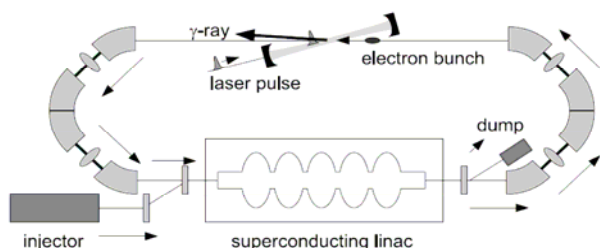


図2：ERL駆動型 $\gamma$ 線源

### 2.3 EUVリソグラフィのためのEUV-FEL

現在のLSIの微細化には、回路パターンを露光・転写するリソグラフィ技術が使われている。従来の真空紫外光の波長193nmよりも、一桁以上短い13.5nm波長の極短紫外(EUV)光を用いるEUVリソグラフィは2010年以降の回路線幅45nm以下を可能にする次世代リソグラフィ技術の最有力候補である。しかし、EUV光の光源としては、プラズマによりEUV光を発生するLPPやDPPがこれまで研究されてきたが、必要とする出力を得るのが困難である、デブリによりミラーを汚してしまうなどの問題がある。一方、SASE-FELでは、DESYのFLASHにおいて13nmの発振が得られており、これを利用したユーザ実験が始まっている<sup>[6]</sup>。FLASHはパルス運転のため大出力EUVを得ることができないが、これをERL化することでリソグラフィに必要なEUV光の発生が可能になる。我々はERL駆動型EUV-FELを提案し、設計を進めている<sup>[7]</sup>。ERL駆動型EUV-FELではLPPやDPPでは発生できないような数kWのEUV光を発生できるので、1台のERL駆動型EUV-FELで複数の露光装置を駆動することができる。FEL光はコヒーレンスであるためプラズマEUV源とは異なる性質の光であるが、適切な光学系でデコヒーレンス化が可能である。また、コヒーレンスを利用した新しいリソグラフィ手法も提案されている。

我々の提案したERL駆動型EUV-FELを図3に示す。装置の長さは約80mである。装置の大きな特徴は光量子発生にSASE-FELを用いること、FELのために電子バンチを100fs程度まで圧縮するためのバンチング・セクションをリニアック中央に設けていることである。アンジュレータ部でのビームパラメータはエネルギー580MeV、電荷量0.33nC、バンチ長100fs、エネルギー広がり0.16%、規格化エミッタンス $0.8 \times 0.4 \text{mm-mrad}$ 、繰返し36MHzである。アンジュレータのパラメータは波長2.0cm、周期数222 $\times$ 4、ギャップ6mm、Kパラメータ0.81である。このパラメータの基でGENESIS<sup>[8]</sup>によるシミュレーション

では、波長13.5nmで2.54kWのEUV光が得られている。シミュレーションの結果を図4に示す。4台目のアンジュレータで飽和している様子が分かる。

EUV-FEL装置1台で複数の露光装置にEUVを供給することが可能であるが、将来は、さらなる小型化が必要と考えており、トムソン散乱を利用した小型EUV光源の検討も行っている。現在はトムソン散乱についての基礎実験の計画<sup>[9]</sup>をしている段階である。

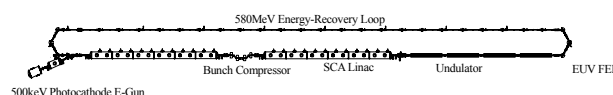


図3：ERL駆動型EUV-FEL

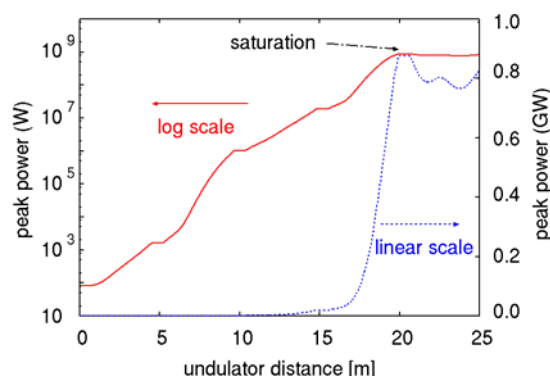


図4：GENESISによるシミュレーション

### 3. ERL要素技術開発

3種類の異なるERL光量子源について述べたが、いずれの光源も鍵となる技術は共通である。特に高輝度電子銃はERLの性能を決定する装置であり、最優先の開発課題である。このため、我々は250kV-50mAのDC電子銃の開発を進めている。これまでにコッククロフトの高電圧試験、すぐれた量子効率と寿命特性をもつ新型光陰極の開発を完了した<sup>[10]</sup>。現在、ビーム引き出し実験に向けた準備を進めており、今後は、陰極の大電流試験、陰極の長寿命化、熱エミッタンス測定、時間応答性測定など、実証機用電子銃の製作に必要な技術開発を行う予定である。陰極の時間応答性についてはせいぜい数10psであるという報告<sup>[11,12]</sup>がある。時間応答性の悪さは暗電流やエミッタンス増大の原因になる可能性があるため、時間応答性改善を図る必要がある。現状では陰極の薄膜化や電子銃からでたところでチョップによる時間成型などの方法が考えられている。この問題については今後詳しく検討していく予定である。

電子銃の開発と並行して、大電流加速用超伝導空洞の研究も進めている。これまでに、偏心フルートによる四極HOMの減衰を提案し、その有効性を確認した<sup>[13]</sup>。現在、KEK、ISSPと共同でERL実証機用の超伝導空洞の試作を進めているが、偏心フルートも採用する予定である。

ERL放射光源ではフェムト秒時間分解の実験も期待されている。この時重要なのはRF信号とレーザーの同期である。フェムト秒レーザーとRF信号

の同期についての要素技術開発も行っている<sup>[14]</sup>。

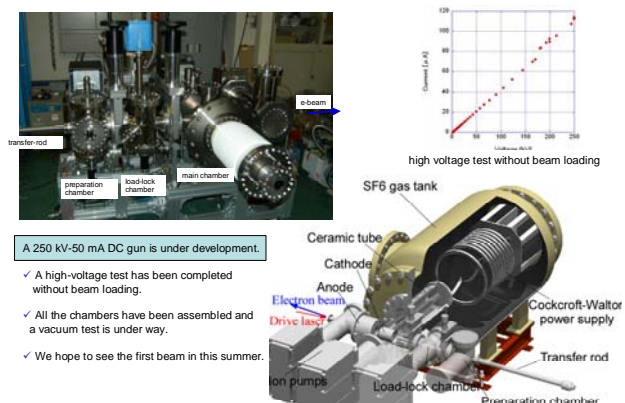


図5：光陰極電子銃の開発

#### 4. JAEA-ERLの稼働状況

JAEA-ERLでのFEL高出力化は休止状態にあるが、加速器本体は常にstand-by状態に保たれており(これまでの各装置の安定化やデータロギングなど制御系改善の恩恵)、電子ビームによるHOMの励起に関する研究<sup>[15]</sup>や赤外FEL光による量子制御のためのFEL光のFROGによる光計測<sup>[16]</sup>が行われている。電子銃直後で熱エミタンスを計測するためのモニタも開発の必要があり、そのようなモニタの試験もJAEA-ERLのビームを用いて行っていく予定である。

#### 5. まとめ

我々が培ってきた高出力FEL、超伝導加速器、ERLに関する技術は電子ビームを用いた光量子源の性能を飛躍的に高めると期待されている。これらの技術を基に様々な用途・要求に応じたERL型放射光源を提案・実現していくことで、広く、科学・産業に貢献していきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] 羽島良一、"エネルギー回収型超伝導リニアック(ERL)次世代放射光源とその拓く世界"、日本放射光学会次世代放射光源検討特別委員会公開シンポジウム、2005年4月12日。
- [2] 河田洋、他、"ERL計画の現状"、本論文集。
- [3] ERL研究会「コンパクトERLが拓く世界」、[http://pfwww.kek.jp/pf-seminar/ERL/ERL\\_07July.html](http://pfwww.kek.jp/pf-seminar/ERL/ERL_07July.html)
- [4] D.L. Clark, et al., "Science-based cleanup of Rocky Flats", *Physics Today*, Sep. 2006.
- [5] 菊澤信宏、他、"ERL型大強度 $\gamma$ 線源による放射性廃棄物中の核種検出"、本論文集。
- [6] <http://vuv-fel.desy.de/>
- [7] R. Hajima, et al., "A Multi-kW EUV Light Source Driven by Energy-Recovery Linac", Proc. of the SEMATECH EUV Source Workshop, Oct. 19, 2006, Barcelona, Spain.
- [8] <http://pbpl.physics.ucla.edu/~reiche/index.html>
- [9] 西森信行、他、"トムソン散乱におけるレーザー強度依存ドップラー赤方偏移測定計画"、本論文集。
- [10] N. Nishimori, et al., "Development of an electron gun for the ERL light source in Japan", Proc. of the ERL07, to be published.
- [11] P. Hartmann, et al., *J. Appl. Phys.* **86** (1999) 2245-2249.
- [12] W. E. Spicer, et al., SLAC-PUB-6306.
- [13] M. Sawamura, et al., "Quadrupole HOM Damping with Eccentric-Fluted Beam Pipes", Proc. of the 2007 PAC, to be published.
- [14] 羽島良一、他、"サニャックループによるフェムト秒レーザーとRF信号の高精度同期"、本論文集。
- [15] M. Sawamura, "Measurement of Beam Position Monitor using HOM Couplers of Superconducting Cavities", Proc. of the 2007 PAC, to be published.
- [16] 飯島北斗、他、"周波数分解光ゲート法による中赤外FELパルスの計測"、本論文集。