

STATUS OF JAEA ERL (2006)

Ryoichi Hajima^{1*}, Masaru Sawamura¹, Ryoji Nagai¹, Nobuhiro Kikuzawa¹,
Nobuyuki Nishimori¹, Hokuto Iijima¹, Tomohiro Nishitani¹, Eisuke Minehara²

¹Japan Atomic Energy Agency, ERL Development Group

Tokai, Ibaraki 319-1195

²Japan Atomic Energy Agency, Advanced Photon Source Development Unit

Tokai, Ibaraki 319-1195

Abstract

A new research group towards future light sources based on energy-recovery linac has been established at Japan Atomic Energy Agency. In the research group, we are developing a high-power free-electron laser using 17 MeV-ERL, which was originally operated as a non-ERL FEL. We also started R&D for an ERL X-ray light source in collaboration with KEK. In this paper, we summarize these research activities.

原子力機構エネルギー回収型リニアックの現状 (2006)

1. はじめに

2005年10月に、日本原子力研究所と核燃料サイクル機構が統合し、日本原子力研究開発機構が発足した。これに合わせて、自由電子レーザー研究グループはERL光量子源開発研究グループ(量子ビーム応用研究部門、先進光源開発研究ユニットに所属)となった。これまでに蓄えた超伝導加速器、エネルギー回収型リニアックの技術を基にして、高出力自由電子レーザー、次世代放射光源などの研究を行っている。本稿では、ERLグループの研究の現況を報告する。

2. 高出力自由電子レーザーの開発

エネルギー回収型リニアック(17 MeV-ERL)を用いた高出力自由電子レーザーの開発では、2003年から3年間を費した入射器増強が完了した。電子銃グリッドパルサーの繰り返し周波数を従来の10.1425 MHzから20.285 MHzとすることで加速電流を5 mAから10 mAに増大した。同時に、2.5 MeV入射器のRF源(2台)を6 kW固体アンプから50 kW-IOTに変更し、将来的には、40 mAまでの加速が可能な仕様となった[1]。主加速器のRF源(2台)は50 kWのままであるが、エネルギー回収を行うことでRF源容量の2倍の電流を加速している。図1に17MeV-ERLのレイアウトを示す。

リニアックFELではスクリーンモニタやファラデーカップをビーム軌道上に挿入し、電子ビーム診断を行う

のが通例であるが、エネルギー回収を行っている状態(RF源容量を超えた電流を加速している状態)では、モニタを挿入しビームを止めた瞬間にエネルギー回収ができなくなるので、このような破壊型のビームモニタは使用できない。われわれのFEL運転では、空洞のフィリングタイム以下の短いマクロパルス($\sim 30\mu\text{sec}$)で調整運転を行い、スクリーンモニタでビーム位置などの確認を済ませた後、長いマクロパルスでエネルギー回収運転を行う方法をとっている。短いマクロパルスでは、スクリーンを挿入しても加速が止まることはないので、この方法でうまくいっている。

入射器パラメータの最適化[2]、1st-arcでバンチ圧縮を行うビーム光学の採用などで、アンジュレータ位置における電子バンチ長を設計値の15 psから8 ps程度まで短くすることに成功した(それぞれFWHM値)。これに伴って電子ビームからFELへの変換効率が大きくなった。FEL変換効率が大きくなると、電子ビームに大きなエネルギー広がりが生じるので、エネルギー回収が難しくなる。一般的なFEL動作ではエネルギー広がり(全幅)は変換効率の5倍程度である。JAEA-ERLでは、アンジュレータ下流の2nd-arcのエネルギーアクセプタンスは、四極磁石位置でのビームパイプ径で決まり、当初の設計では、FEL変換効率1.5%と設定し、規格化エミッタンスを30 mm-mradとした時のエネルギーアクセプタンス7%に対応する内径55 mmのビームパイプを使用していた[3]。最近の運転では、バンチ長が短くなったために、FEL変換効率とエネルギー広がり

* E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp

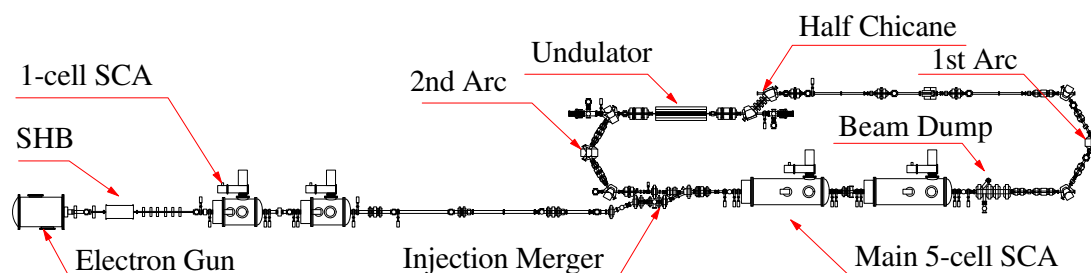


図 1: 17MeV ERL

が大きくなり、2nd-arc でビーム電流の一部が落ちる現象が観測されるようになった。このビーム損失に対応するため、アンジュレータ下流の周回軌道 (2nd-arc) のエネルギーアクセプタンスを大きくする改造を施した。四極、六極をポア径の大きなものに入れ換え、ビームパイプの内径を 100 mm としたので、エネルギーアクセプタンス当初設計の約 2 倍となった。FEL 発振を行いながらワイアースキャナーでエネルギー広がり測定し、アクセプタンス増大の効果を確認しながら、さらなる調整を進めている。これまでに FEL 出力 0.7 kW (マクロパルス内平均出力) が得られている。

3. ERL、FEL 利用実験

FEL 光を使った様々な実験を行うために、加速器室から光実験室まで、約 22 m の FEL 光輸送系を設置した。赤外 (波長 $22\mu\text{m}$) の光を損なうことなく輸送するために、光共振器のセンターホールから出た光を二つの楕円ミラーを用いて拡大し、ほぼ平行な光ビームとした後に平面ミラーで輸送する方式を採用した。すでに組み立てと調整を完了し、ほぼ 100% の輸送効率を得られている。実験室内での集光特性も良好である。原子炉シュラウドで問題となっている冷間加工応力腐食割れをレーザー非熱加工により防止する技術の実証、フェムト秒チャープパルスを利用した量子制御実験の試みなどを進めている [4]。

ERL では、蓄積リングに比べて短い電子バンチ加速できるので、大強度のコヒーレント放射光の発生が期待できる。京都大学、大阪府立大学との共同研究で、周回軌道からのコヒーレント放射光の測定実験を行っている [5]。

4. 次世代放射光源のための電子銃開発

第 3 世代放射光施設 (SPring-8 など) を超える X 線放射光源として、次世代放射光源の開発が世界各国で始まっている。次世代放射光源では、コヒーレンスと超短

パルスがキーワードであり、このような X 線を発生する方式として X 線自由電子レーザー (XFEL) とエネルギー回収型リニアック (ERL) がある [6]。われわれは、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 型次世代放射光源の実現にいたる開発計画を提案し [7]、2006 年 3 月には、同様の計画を提案している KEK と研究協力協定を締結し、共同で R&D を開始した [8]。

ERL 放射光源を実現するために重要な要素技術が電子銃である。われわれは、低エミッタンス (0.1 mm-mrad)、大電流 (100 mA) の電子ビームを安定に発生するための技術開発を行っている。規格化エミッタンス 0.1 mm-mrad は、XFEL 用の電子銃よりもさらに 1 桁小さなエミッタンスである。直径 2 mm、室温の陰極から発生する電子の熱エミッタンスがおおよそ 0.1 mm-mrad であることを考えると、熱陰極電子銃の採用は不可で、光陰極電子銃でもこれを満たすことは容易でない。唯一、原理的に可能性のあるのは、NEA (negative electron affinity) 表面を有する光陰極電子銃である。

これまでに、NEA 表面を有する GaAs 陰極は、偏極電子源、ERL-FEL 用電子源として実績があり、小さな引きだし電流ではエミッタンス 0.1 mm-mrad が達成されている [9] [10]。また、大電流動作では JLAB-FEL で 10 mA の運転実績がある。

われわれは、JLAB の実績を超えた大電流動作 (100 mA) が可能な光陰極として、超格子構造をもつ Al-GaAs を提案し、その開発を進めている。従来のバルク GaAs では、大電流 (高い量子効率) を得るには、バンドギャップよりも大きなエネルギーをもつレーザー光子を入射する必要があり、熱エミッタンスが大きくなってしまふ。逆に、熱エミッタンスを小さく保つために、バンドギャップぎりぎりのレーザー波長を選ぶと大電流が引き出せない。これらの欠点は、バルク GaAs のバンド構造に由来する現象であり、超格子構造を採用することで解消できる。このような光陰極の性能評価を行うためのテストベンチを構築し、データの取得を始めている

[11]. なお、光陰極の作成には、名古屋大学竹田研究室の協力を得ている。

DC 電子銃については、250 kV、50 mA の電子銃と極高真空のカソード活性化チャンバー等の設計製作を行い、今年度末には、DC 電子銃からの電子ビーム引き出しができるように作業を進めている [12][13]。

5. 次世代放射光源のための高周波機器の開発

ERL 放射光源の主加速器では、300 台を超える超伝導空洞が並ぶ。空洞の機械的振動（マイクロフォニック）に由来する RF 振幅、位相の擾乱を補償するために、各空洞を独立した RF 源で駆動するのが基本構成である。したがって、RF 機器は、ERL 建設費の主要な部分を占めることになる。われわれは、将来の ERL 放射光源に備えた R&D として、30kW-IOT の試験、アナログ RF 制御系の開発を進めている。これらの開発には、17MeV-ERL の資産を最大限に活用している [14][15]。

6. まとめ

原研 FEL から原子力機構 ERL へとグループの名称が変わり、研究内容も高出力自由電子レーザーからさらに広がり、次世代放射光源に向けた技術開発が新しく加わった。われわれが培ってきたエネルギー回収型リニアックの技術は、赤外自由電子レーザー、X 線次世代放射光源のみならず、テラヘルツからガンマ線までの全ての波長において、従来光源をはるかに上回る性能を実現しうる加速器の普遍的な技術である。われわれは、この ERL 技術に磨きをかけて、これらの新しい光源の実現を通して、広く、科学・産業に貢献していきたいと考えている。

- [1] 永井良治 他, “JAEA ERL-FEL におけるマイクロパルス繰返しの二倍化”, 本論文集.
- [2] 永井良治 他, “シミュレーテッドアニーリングによる原研 ERL 入射部のパラメータ最適化”, 2004 年加速器学会年会論文集.
- [3] R. Hajima, and E. J. Minehara, Nucl. Instrum. Meth. A507 (2003) 141–145.
- [4] 飯島北斗 他, “JAEA-FEL におけるチャープパルス計測の現状”, 本論文集.
- [5] 高橋俊晴 他, “JAEA-ERL における CSR スペクトルの計測”, 本論文集.
- [6] 羽島良一, 放射光 14, 323–330 (2001).
- [7] 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光源検討特別委員会公開シンポジウム, 2005 年 4 月 12 日.
- [8] 河田洋 他, “ERL 放射光源計画と R&D の現状”, 本論文集.
- [9] B. M. Dunham, L. S. Cardman and C.K. Sinclair, PAC-1995, 1030.
- [10] 山本尚人 他, “NEA-GaAs 型フォトカソードの初期エミッタンス測定”, 本論文集.
- [11] 西谷智博 他, “高輝度 NEA-AlGaAs フォトカソード電子源の開発”, 本論文集.
- [12] 飯島北斗 他, “ERL 光量子源のためのフォトカソード DC 電子銃開発の現状”, 本論文集.
- [13] 永井良治 他, “ERL 放射光源のためのロードロック型電子銃の設計”, 本論文集.
- [14] 永井良治 他, “アナログ位相・振幅制御型 RF 制御装置の位相安定度測定”, 本論文集.
- [15] 沢村勝 他, “IOT 高周波出力特性”, 本論文集.