

原研 ERL における 10kW 級 FEL の開発

羽島 良一¹、沢村 勝、永井 良治、菊澤 信宏、西森 信行、峰原 英介
日本原子力研究所
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

原研 ERL-FEL では、10kW 級発振を目指した装置の開発を行っている。本稿では、これら開発の内容を概括し、将来の展望を述べる。具体的には、ERL におけるエネルギーアクセプタンスと FEL 変換効率の見積り、ビーム電流増大のための入射系増強の戦略と現状、超伝導加速器の安定化を目指した RF 制御系の改良などである。

1. はじめに

原研超伝導 FEL グループでは、当初の目標である 2kW 級発振 [1] を達成した後、エネルギー回収型リニアックへの改造を施し [2]、これを用いた 10kW 級 FEL 装置の開発を進めている (図 1)。

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) は、リニアックの特徴である「高輝度、超短バンチ」と蓄積リングの特徴である「大電流連続加速」の両者をあわせ持つことから、高出力 FEL [3]、次世代 X 線放射光源 [4]、大強度テラヘルツ光源 [5]、電子冷却用加速器 [6]、電子/イオン衝突加速器 [7] などへの利用が可能である。ERL へ寄せられる期待の大きさは、世界最初の ERL 実証から 4 年という短期間で PAC (Particle Accelerator Conference) のセッション名に取り上げられたことから明らかである。ちなみに、FEL が PAC のセッションに登場したのは、FEL の発明から 15 年後であった。

われわれは、10kW 級 FEL を目指した装置開発と並行して、将来の ERL へ向けた基礎研究を進めている。本稿では、これらの研究開発を紹介する。また、紙幅の都合から本稿では取り上げないが、われわれがグループが発見した自己変調型 FEL 発振 [8] の特性解析とこれを用いた非調和振動励起、量子制御実験の準備も進めている。

2. 10kW 級 FEL 開発

2.1 エネルギーアクセプタンスと FEL 変換効率

FEL 出力 P_{FEL} は、電子ビームパワー P_{beam} と変換効率 η_{FEL} の積として与えられる： $P_{FEL} = \eta_{FEL} P_{beam}$ 。したがって、FEL の高出力化には、電子ビームパワーを増やすと同時に変換効率を増やす必要がある。

ところで、変換効率を上げると FEL 発振により生じる電子ビームエネルギーの広がりも大きくなる。エネルギーの広がった電子ビームを損失無く輸送し、エネルギー回収を行うのは困難であるため、エネルギー広がりには許容される上限があり、これが変換効率も制限することになる。JAERI-ERL におけるエネルギー広がり

は 2nd-arc のビームダクト内径で制限される。運動量分散が最大 ($\eta_x = 0.6\text{m}$) となる四極磁石位置でのダクト内径 (55mm) から求めたエネルギーアクセプタンスは 9% (全幅) であるが、実際にはエミッタンスによるビーム広がり効果も含めなければならない。図 2 は、アンジュレータからビームダンプまでのエネルギー回収軌道のアクセプタンスを PARMELA [9] を使って計算した結果である。規格化エミッタンス 30mm-mrad の時、8% のエネルギーアクセプタンスとなる。図 3 は 1 次元時間依存 FEL シミュレーションコードを用いて、FEL 変換効率とエネルギー広がり計算した結果である。エネルギー広がり 8% は、FEL の変換効率 1.5% に対応することがわかる [10]。

2.2 入射器の増強

JAERI-ERL の最大エネルギーは、超伝導空洞の加速勾配 ($\sim 4.5\text{MV/m}$) から約 17MeV である。ビームパワーの増大には、電流を増やす必要がある。JAERI-ERL では熱陰極カソードとグリッドバルサーを組み合わせた電子銃を用いている。これまで 5mA (0.5nC, 10.4125MHz) で運転を行ってきたが、これを 40mA (1nC, 41.65MHz) に増大する作業を進めている。これにより、ビームパワーは 700kW となる予定である。

現在、入射電流の増大に向けて 41.65MHz で駆動可能なグリッドバルサーの製作、および、前段加速器 RF 源の更新を進めている。グリッドバルサーは、BINP (ロシア・ブドカー研) の協力のもと開発中で、すでに、実機に取り付けた状態での試験がほぼ終了している [11]。

前段加速器は、これまでの 6kW 全固体アンプに代わり、40kW IOT-klystrode で駆動される。現在、IOT 本体と電源の設置と定格運転試験が完了し、アイソレータを含めた残りの部品を調達中である。

2.3 RF 制御系の更新

超伝導リニアックの運転には、フィードバック制御回路による RF 振幅・位相の安定化が欠かせない。ところが、これまでの JAERI-ERL の RF 制御回路は温度ドリフトが大きく、再現性、安定性に難があり運転に支障をきたしていた。位相・振幅の主な変動は 5~10 分の周期で起こる温度ドリフトであり、これは制御室から加速器本体までのケーブル (約 50m)、およびフィードバック回路内の位相検出用ミキサで生じることがわかっている。そこで、これらの不安定要因を取り除くために RF 制御系の更新を行うこととした。

更新作業の内容は以下の通りである。まず、これまで制御室に設置していたフィードバック回路を加速器の近くに移動し、温度変動の一因であるケーブル長を短くする。また、マスター・オシレータから各フィードバック回路への基準 RF 信号の伝送は、温度による電気長変動

¹ E-mail: hajima@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

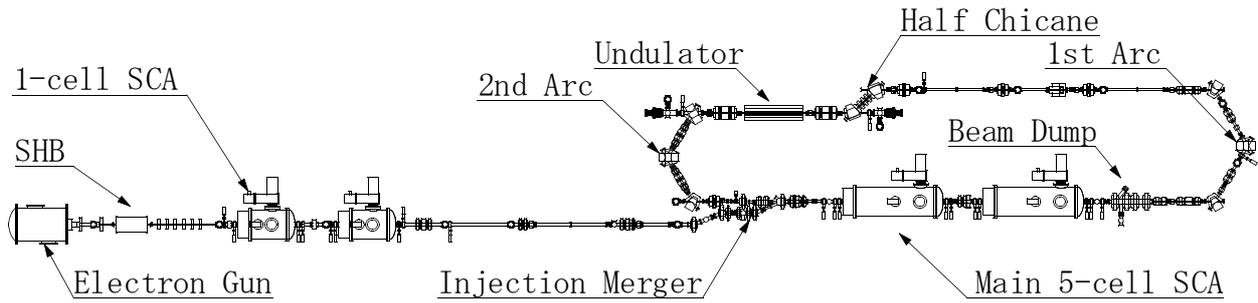


図 1: JAERI-ERL のレイアウト: 230kV 電子銃で生成した電子バンチは、2.5MeV まで加速した後、ERL 軌道へ入射される。主加速器で 17MeV に加速した電子バンチは FEL 発振を行った後、周回軌道を経てエネルギー回収され、ビームダンプへ捨てられる。

の少ないケーブルを温度制御して用いる [12]。さらに、フィードバック回路自体も、温度特性のよい部品を使った新しいものに置き換え、安定性の向上に万全を期す。今年度末までに更新作業を終える予定である。

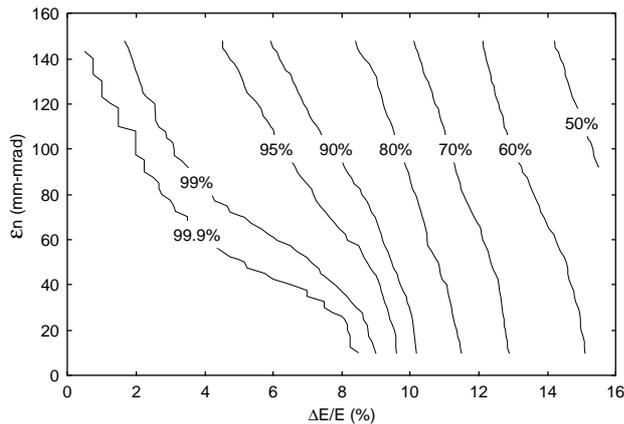


図 2: アンジュレータからビームダンプまでのアクセプタンス計算結果。エネルギー広がりとおミッタンスをパラメータにしたビーム透過率を示す。

2.4 HOM 特性解析

ERL で加速できる平均電流の上限は HOM 不安定性の閾値で決まる [13]。JAERI-ERL における 10kW 級 FEL の開発、また、将来の ERL 光量子源の設計を行う上で、HOM 不安定性の理解と対策は重要な研究課題である。われわれは、HOM 不安定性解析コードを作成し、これを用いた閾値電流の計算を行い、JAERI-ERL では 40mA の加速でも不安定性を起こさないことを確認している。今後は、ERL 運転中の HOM 計測を行い、計算と比較することで HOM 不安定性現象をさらに詳しく調べる予定である [14]。

2.5 光共振器の最適設計

JAERI-ERL における FEL 共振器は両端に金属ミラー (金コート銅ミラー) を用い、出力結合はセンターホール

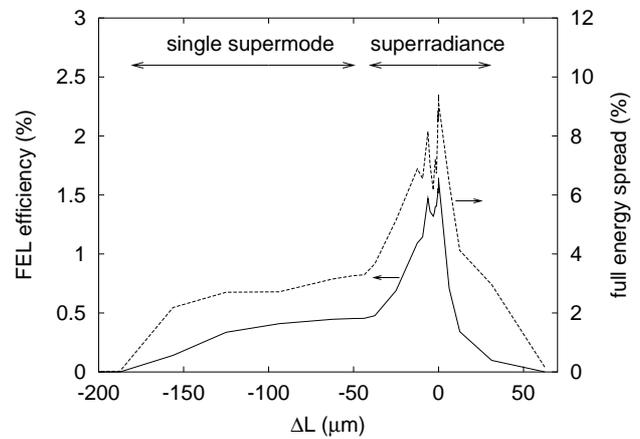


図 3: FEL 変換効率 (実線) とエネルギー広がり (点線) の計算結果。横軸は、光共振器のデチューニング長さ。

もしくはスクレイパー・ミラー方式を採用している。特にスクレイパー・ミラー方式は、差し込む深さを変えることで、取り出し効率を可変にでき、FEL 発振の状態を制御することができる利点がある。

しかし、これらの出力方式では、光の横方向モードを乱すために余分な回折損失が生じ、FEL パワーの一部が散逸してしまうこと現象が避けられない。高出力の FEL を実現するためには、この損失を最小にするような光共振器の設計を行う必要がある。われわれは光共振器設計コードを開発し、最適設計を進めている [15]。

2.6 FEL 出力の増大

入射器の増強が完了すれば、ビームパワーは 700kW となり、エネルギーアクセプタンスの限界である FEL 変換効率 1.5% で発振を行えば、10kW の FEL パワーが得られる。ただし、共振器中で散逸する光を差し引くと、実際に取り出せる FEL パワーは 5kW 程度にとどまると考えられる。さらに FEL 出力を増大し、10kW を超える取り出しパワーを達成するために、二つの方法を考えている。ひとつは、2nd-arc を改造し、エネルギー・アクセプタンスを大きくする方法であり、もうひ

とつは、光共振器の出力結合を誘電体多層膜ミラーやプリュスター板で行い、モードを乱さずに FEL 光を取り出す方法である。エネルギーアクセプタンスに関しては、四極磁石を改造しポア径を広げれば大きくできるが、現状の 1.5 倍程度が限界であろう。一方、光共振器については、われわれ FEL の発振波長 (20 μ m) で使える誘電体多層膜ミラーとして既存の製品がないために、特別に試作を行ったがうまくいっていない。プリュスター板を用いる方式は、板の両面から二方向に光が出る点を除けば問題はなさそうである。今後検討していきたい。

3. 次世代光源の基礎研究

冒頭で述べたように、ERL は次世代の高輝度光量子源 (THz、赤外、VUV、X 線) として期待されており、世界中で研究開発が始まろうとしている。われわれは、すでに ERL を完成し稼働している利点を生かして、これらの研究開発を積極的にリードしていきたいと考えている。前節で列挙した 10kW FEL 開発の各項目は、もちろん、次世代光量子源につながる研究であるが、これ以外にいくつかのテーマを立てている。

3.1 CSR 効果の解析と実験

ERL を用いた高輝度 X 線放射光源は、第 3 世代光源 (SPring-8 など) に代わる次世代光源の候補である。ERL の長所は、X 線の回折限界に迫る小さなビームエミッタンスによって横方向に高いコヒーレンスを持つ放射光が得られる点、また、パンチ圧縮によって 100fs の超短パルス X 線が発生できる点にある。ところで、100fs の電子パンチが偏向軌道を通る場合、コヒーレント・シンクロトロン・放射光 (CSR) によるエミッタンス増大が問題となる。この CSR によるエミッタンス増大は、これまで X 線 FEL のパンチ圧縮器の設計で議論されてきたが、ERL 周回軌道でも同様の問題が生じる。

われわれは、ERL 周回軌道をうまく設計することによって、CSR によるエミッタンス増大を補償できることを見出した [16]。JAERI-ERL において、このエミッタンス補償の実験を行うことを検討している。

3.2 THz、ミリ波測定実験

ERL は超短パンチ、大電流の電子ビームを連続的に加速できることから、大強度 THz (テラヘルツ) 光源としても大いに期待されている [5] [17]。これまでも、リニアックで生成されるピコ秒～フェムト秒の短パンチから放射されるコヒーレント放射は THz からミリ波の領域で有用な光源として注目され利用されているが、平均電流が 100mA に達する ERL では、小さな duty cycle でしか運転できないリニアックに比べて遥かに強いコヒーレント放射が得られる。

われわれは、JAERI-ERL において、コヒーレント放射を測定する実験を提案している。ERL 周回軌道の 1st-arc における最初の偏向磁石のヨークとダクトを改造し、コヒーレント放射光の取り出しポートを設けることを考えている。

4. まとめ

原研自由電子レーザーグループでは、すでに完成したエネルギー回収型リニアック (ERL) を使った 10kW 級 FEL の開発を進めている。今年度中に入射器増強、RF 制御系の更新作業を完了し、来年度早々にも FEL 発振を再開する予定である。その後は、高出力 FEL を使った非熱加工実験や、自己変調特性を生かした量子制御実験を行いたいと考えている。また、ERL 型次世代光量子源を目指した基礎研究も並行して進めており、JAERI-ERL を使った実験も提案している。

参考文献

- [1] N. Nishimori et al., Nucl. Instrum. and Meth. **A475** (2001) 266–269.
- [2] R. Hajima et al., Nucl. Instrum. and Meth. **A445** (2000) 384–388; R. Hajima et al., to be published in Nucl. Instrum. and Meth. (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00849-0
- [3] G. R. Neil et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 662–665 (2000); George R. Neil and Lia Merminga, Rev. Mod. Phys. **74** (2002) 685.
- [4] 羽島, 日本放射光学会誌, vol.14 (2001) 323; S. M. Gruner et al.: Rev. Sci. Instrum. **73** (2002) 1402.
- [5] G. L. Carr et al., Nature **420** (2002) 153.
- [6] I. Ben-Zvi et al., Proc. 2001 Particle Acc. Conf. (2001) 48.
- [7] S. Peggs et al., Proc. 2001 Particle Acc. Conf. (2001) 37.
- [8] R. Hajima and R. Nagai, accepted for publication in Phys. Rev. Lett. (2003).
- [9] PARMELA ver. 3.26; L. M. Young, private communications.
- [10] R. Hajima et al., to be published in Nucl. Instrum. and Meth. (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00858-1
- [11] 西森信行 他, 本論文集, WP-9.
- [12] 永井良治 他, 本論文集, TP-3
- [13] L. Merminga, Proc. 2001 Particle Acc. Conf. (2001) 173.
- [14] 沢村勝 他, 本論文集, TP-28.
- [15] 永井良治 他, 本論文集, TP-27.
- [16] R. Hajima, Jpn. J. App. Phys., Vol. 42 (2003) No. 8A, to be published.
- [17] 高橋, 木村, 羽島, 日本放射光学会 2003 年年会予稿集 p.378 (2003).