

原研超伝導 FEL におけるエネルギー回収系の設計と製作

羽島良一¹、静間俊行、沢村勝、永井良治、西森信行、菊澤信宏、峰原英介
日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター自由電子レーザー研究グループ
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

原研超伝導 FEL は、昨年までに当初の目標を大きく上回る平均出力 2 kW 超の発振に成功した。今年度は、さらなる FEL 出力向上を目指してエネルギー回収系の製作を行なっている。エネルギー回収系を構築するために、入射器ビームラインのオフセット（二段梯子）及びアイソクロナスな周回軌道の追加を行ない、加速器のレイアウトに全面的な変更が施された。本報ではエネルギー回収型リニアックの設計に現われる問題点を整理した後、われわれの設計例を紹介する。また、回収系製作の進捗状況について報告する。

1. はじめに

原研超伝導自由電子レーザーは、計画立ち上げ当初の目標であった「1kW 平均出力」を大きく上回る 2.3kW 発振を昨年度までに達成した^[1]。この高出力発振に至る過程には、さまざまな技術開発の積み上げと物理現象の追究があった。すなわち、無蒸発クライオスタット冷凍機の開発、5ps の電子バンチを 100fs 以下のタイミングジッターで生成する入射器の実現、遠赤外光共振器の取り出し効率の最適化^[2]、これまでに知られていなかった FEL 発振方式(持続的超放射発振; quasi-stationary superradiance)の発見^[3]などである。

われわれは、さらなる FEL の高出力化、高効率化を目指して、原研超伝導リニアックをエネルギー回収型リニアックへと改造することにした。この改造は、10kW-FEL という次の目標達成の手段であるとともに、将来の産業用小型高出力 FEL、VUV~X-ray 領域の高輝度放射光源の設計・製作に必要な知見と技術を蓄積する意味も持つ。

原研 FEL におけるエネルギー回収系の具体的な検討は 1999 年から始まった。1999 年夏に電子ビーム周回軌道の基本設計を終え^[4]、2000 年までに入射ラインを含めた設計と磁石類の製作が完了した^[5]。超放射 FEL 実験が一段落した 2001 年の 3 月に既存リニアックの分解撤去を行ない、エネルギー回収型への移行作業を開始した。本稿では、エネルギー回収系の設計と製作について報告する。

2. エネルギー回収型リニアック

エネルギー回収型リニアック (ERL; Energy-Recovery Linac) とは、加速した電子ビームでしかるべき実験を行なった後、電子ビームを加速管に減速位相で再入射し電子エネルギーを RF パワーとして回収するものである。これにより、RF パワーを増やさずに電子ビームのパワーを大きくする(電流を大きくする)ことが可能になる。

エネルギー回収のアイデアは 1960 年代に提案され^[6]、1980 年代になると原理実証実験が試みられた^[7-8]。しかしながら、これらの実験では HOM 不安定性、RF 不安定性のために実用に耐え得る性能は得られなかった。その後、超伝導加速器の進歩を経てエネルギー回収を有効に動作させるための技術障壁がクリアされた。TJNAF(Thomas Jefferson National Accelerator Facility)では高出力 FEL のためのエネルギー回収リニアック IR-demo を完成し、すぐれたパフォーマンスを実証した^[9]。

TJNAF/IR-demo の成功を受けて、ERL を使った新しい装置・施設が次々と提案されている。放射光源 (SOR、FEL) では、TJNAF/IR-demo の 10kW-upgrade (2002 年に建設)^[10]、BNL/NSLS の改造 (PERL 計画として提案)^[11]、Cornell の ERL 放射光源(proto-type 準備中)^[12]などである。また、素粒子物理実験用の加速器では BNL/RHIC の電子冷却用 ERL^[13]、イオン-電子衝突加速器^[14]が提案されている。このように、エネルギー回収型リニアックには多くの活躍が期待されている。

3. JAERI-FEL の設計に見るエネルギー回収の諸問題

エネルギー回収系の設計における課題は、以下のよう整理できる。

- 電子ビーム周回軌道の設計
- 入射合流、ダンプ分離部の設計
- RF 安定性の確保

なお、GeV 級の ERL では数百メートルに及ぶ加速器における横方向のビーム収束(エネルギーの異なる 2 本のビームの同時収束)が必要となるが、加速エネルギーが比較的低い JAERI-FEL(17MeV)では大きな問題とはならないので、ここでは述べない。

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

エネルギー回収用の周回軌道はアイソクロナスが基本となる。TJNAF/IR-demo は MIT/Bates 型の 180 度アークに補正用の四極・六極磁石を追加する方式を採用している。われわれは、IR-demo とは異なる triple-bend 型の 180 度アークを用いることとした(図 1、2 参照)。triple-bend を採用した最大の理由は加速器室の空間的制約であるが、既存の 180 度アークの資産(偏向磁石、四極磁石)を流用できる点も考慮した。

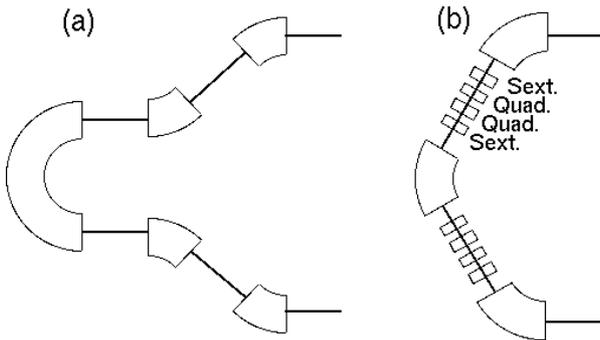


図 1 : エネルギー回収用アイソクロナス軌道的设计例。
(a) Bates 型アーク、(b) triple-bend 型アーク

アンジュレータ後のアークでは FEL 相互作用でエネルギーの広がった電子ビームを輸送するため、エネルギーアクセプタンスの確保と高次収差の補正が必要となる。われわれの設計ではアークの四極磁石で分散関数が最大値 0.6m、ダクトの内径が、60mm なのでエネルギーアクセプタンスは±5%である。後半のアークには、二次収差(T166, T266, T566)を補正するための二組四台の六極磁石を挿入してある。TJNAF/IR-demo の運転では T566 の補正を行なわない場合に FEL=ON で減速ビームのパンチ長が伸びてしまい、ビームダンプでのエネルギー広がりが大きくなる現象が観測されている。

triple-bend 型は、横方向の収束に関して、比較的小さなベータatron振幅でマッチングが取れるため、アンジュレータからアークへの入射がスムーズに行なえる利点があるが、周長の調整ができない欠点もある(Bates 型は微調整可能)。われわれは、後半のアークの構成磁石を移動架台に乗せて周長の調整を行なう設計とした。あらかじめ所定の周長となるように周回軌道を組み立てるので、移動架台による調整

は微調整(数 mm)で十分と考えているが、ストロークは 150mm とつてある。

入射合流部は、図 3 のような三種類の構成が考えられる。われわれの入射器はエネルギーが 2MeV と低いので、合流部における空間電荷の影響が無視できない。つまり、シケインや梯子段の中で生じる縦方向の電場による電子エネルギーの再配分が、合流後のビームエミッタンスの増大をもたらすのである。この影響を小さくするには分散のある距離の短い (R56 の小さい) 構成であるスライド入射がよい。しかし、われわれの加速器室ではこの方式を配置することができないので、次善の方式として二段梯子を採用した。合流部におけるエミッタンス増大は、 $20\pi \text{ mm-mrad} \rightarrow 27/24\pi \text{ mm-mrad}$ (水平/垂直)と計算されている^[5]。FEL のパフォーマンス確保とエネルギー回収の動作保証には十分な値である。

RF 安定性に関しては、予備的な検討を行なった結果、既存の制御回路(フィードバック回路)で安定な運転ができる見通しを得ている^[4]。

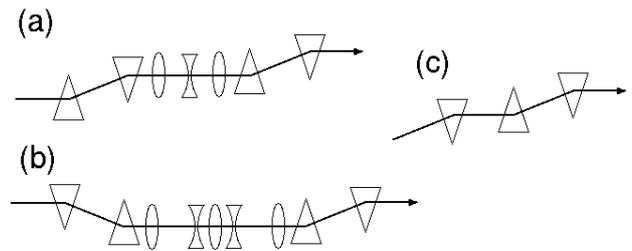


図 3 : 入射合流部の設計例。(a)二段梯子、(b)シケイン、(c)スライド入射

4. エネルギー回収系の製作と組み立て

原研 FEL 建屋は、入射器と主加速器が別の部屋に分かれている特殊な構造となっている。このような室内に加速器、電磁石、アンジュレータなどを精度良く並べるには工夫が必要となる。これまではレーザートランシットを使った位置決めを行なっていたが、エネルギー回収系のようにやや複雑な配置に対して同様の方法は困難と考えた。そこで今回は、三次元計測システム^[15]を購入し、各機器の位置を測量しながら位置決めを行なうこととした。

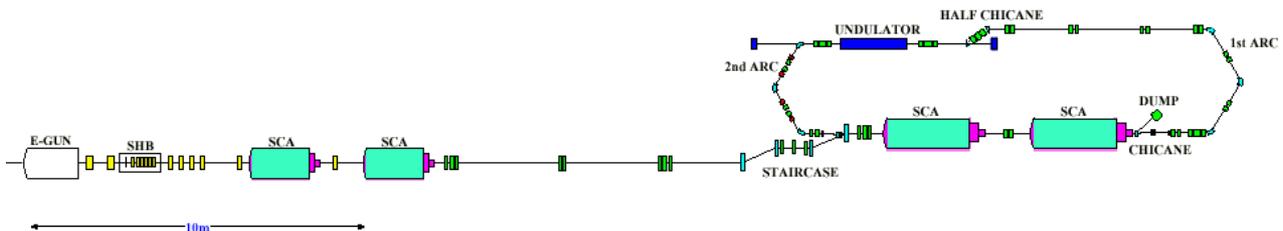


図 2 : JAERI-FEL エネルギー回収型リニアックのレイアウト

磁石設置誤差が電子ビームの運動に与える影響は、磁石の強さ、磁石位置でのビームエンベロープなどの関数として整理できる^[16]。また、計算コード TRANSPORT を使った誤差の評価も可能である。われわれのビーム輸送系に対しては、0.5mm 以内の誤差（水平、垂直方向）であれば、ビームの周回輸送に与える影響は小さいとの結果を得た。

三次元計測システムを使えば、各機器の位置（座標原点に対する）を測定することができるので、入射器、主加速器、周回軌道のすべてを所定の位置に並べることができる。実際の作業では、繰り返し測定を行ないながら、目標位置に対しておおよそ 0.3mm 以内の誤差をめどに設置を行なっている。

5. 作業の現状と今後の予定

作業の進行状況は当初の予定よりもやや遅れており、6月25日現在、入射系（電子銃から合流部まで）のアラインメントと真空排気、前段加速器の真空排気・冷凍機立ち上げ・RFテスト、主加速器のアラインメントまで完了している。前段加速器には、移動（不慮の振動やゴミの吸い込み）に伴う性能劣化は見られなかった。

作業が遅れている原因は、全ケーブルの引き直し（ラダーの追加）、制御室の模様替えなど、エネルギー回収系への改造を機会に、装置全体の大幅な見直しを行なったためと、新たに製作した真空ダクトに手直しが必要だったためである。

今後の予定は、入射器のコミッションング（7月）、周回軌道の組み立て（8～9月）、周回軌道のコミ

ッションング（10～12月）を予定している。順調に進めば、今年度中にエネルギー回収の実験に着手できる見込みである。

参考文献

- [1] N.Nishimori et al., "High Extraction Efficiency Observed at the JAERI Free-Electron Laser", in Proc. FEL-2000.
- [2] R.Nagai et al., J. Nuclear Science and Technology, **38** (2001) 15-18.
- [3] R.Hajima et al., "Analyses of Superradiance and Spiking-Mode Lasing Observed at JAERI-FEL", in Proc. FEL-2000; N.Nishimori et al., Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 5707-5710.
- [4] R.Hajima et al., Nucl. Instr. and Meth. **A445** (2000) 384-388.
- [5] T.Shizuma et al., in Proc. EPAC-2000, pp.1074-1076; R.Hajima et al., in Proc. EPAC-2000, pp.1033-1035.
- [6] M.Tigner, Nuovo Cimento **37** (1965) 1228-1231.
- [7] T.I.Simith et al., Nucl. Instr. Meth. **A259** (1987) 1-7.
- [8] D.W.Feldman et al., Nucl. Instr. Meth. **A259** (1987) 26-30.
- [9] G.R.Neil et al., Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 662-665.
- [10] S.Benson et al., "A 10kW IRFEL Design for Jefferson Lab", in Proc. PAC-2001.
- [11] I.Ben-Zvi et al., "Photoinjected Energy Recovering Linac Upgrade for the NSLS", in Proc. PAC-2001.
- [12] I.Bazarov et al., "The Energy Recovery Linac (ERL) as a Driver for X-ray Producing Insertion Devices", in Proc. PAC-2001.
- [13] I.Ben-Zvi et al., "Electron Cooling for RHIC", in Proc. PAC-2001.
- [14] L.Merminga et al., "An Energy Recovery Electron Linac-on-Proton Ring Collider", in Proc. HEACC-2001.
- [15] 株式会社ソキア, NET2100
- [16] D.Douglas, CEBAF-TN-96-035 (1996)