

# 原研 FEL におけるエネルギー回収動作の実証と 10kW upgrade 計画

羽島 良一<sup>1</sup>、沢村 勝、永井 良治、菊澤 信宏、西森 信行、静間 俊行、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

原研超伝導 FEL では、昨年度から進めてきたエネルギー回収系の据付が完了し、ビームコミッショニングの段階に入っている。これまでに、ほぼ 100% のエネルギー回収動作が確認されている。現在、エネルギー回収モードでの FEL 発振を目指して、beam optics の最適化を行なっている。さらに、10kW 出力を目標にした入射系増強の準備と HOM 不安定性の実験・解析を並行して進めている。

## 1. はじめに

原研超伝導 FEL では、エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac ; ERL) の開発を進めている。ERL は小さな RF パワーで大電力電子ビームを連続的に生成できることから、大出力 FEL のドライバーとして期待されているだけでなく、第三世代放射光源に代わる次世代光源の有力な候補としても大きな注目を集めている。これは、ERL を使えばフォトカソード電子銃で生成した高輝度の電子バンチを放射減衰による劣化を起こさずに数 GeV まで加速することができるので、第三世代光源では生成不可能なサブピコ秒領域の回折限界放射光が得られるからである [1]。

世界の ERL 開発の現状としては以下の計画が立案中、もしくは進行中である [2]。大出力 FEL では米国の TJNAF における 20kW FEL ドライバー。次世代放射光源では、米国 Cornell 大学の ERL 放射光源、BNL/NSLS (第二世代放射光源) の upgrade として PERL 計画、LBL のフェムト秒放射光源、ドイツでは BESSY の放射光 (XFEL との組み合わせ)、Erlangen 大学の ERL-SYN 計画、イギリス Daresbury の 4GLS (IR/VUV/XUV-FEL と放射光) などである。国内では原研 FEL の他に KEK でも ERL 研究開発の検討が始まっている。

本稿では、原研 FEL における ERL 開発の現状として、エネルギー回収実験の結果を報告する。また、効率的なエネルギー回収動作と HOM 不安定性の克服に必要な加速・減速ビームの同時収束の実現について述べる。最後に、10kW FEL を目指した今後の計画とその準備状況を紹介する。

## 2. 原研 ERL の構成とパラメータ

原研 ERL は、これまでの超伝導リニアック FEL を拡張する形で建設された (図 1)。入射器は 230kV 電子銃、SHB (83.3MHz)、前段加速器 (500MHz, 1cell) × 2 で構成され、2.5MeV、5mA (500pC × 10.4MHz) の電子ビームを生成する。入射器におけるバンチの形成は、これまでの原研 FEL と同様の方式を踏襲している。電子銃グリッドパルサーで生成した 800ps (FWHM) のバン

チを SHB による速度変調と前段加速器までのドリフト (6m) で 120ps まで圧縮する (いわゆる ballistic bunching)。さらに前段加速器における ponderomotive bunching、その後のドリフト (9m) における ballistic bunching を経て、合流部の直前で 60ps のバンチを得る。合流部 (2step staircase merger) における magnetic bunching で最終的に 15ps (FWHM) まで圧縮されたバンチが主加速器に入射される。

入射した電子は主加速器 (500MHz, 5cell) × 2 で 17MeV まで加速した後、周回軌道を通してアンジュレタに導かれ FEL 発振を行ない、さらに周回軌道を通して主加速器に再入射し減速 (エネルギー回収) され 2.5MeV でダンプされる。再入射位相調整のための周回軌道長変更は 2nd-arc の各磁石を移動架台に乗せることで実現している。入射器、周回軌道の設計の詳細は関連の論文を参照されたい [3]。

## 3. エネルギー回収実験

エネルギー回収用の周回軌道は 2001 年 10 月に完成し、11 月からビームコミッショニングを開始した。現在、設計通りの特性が得られるように、入射器 (SHB と前段加速器の位相、振幅) の調整、beam optics の最適化を進めている。ビーム損失による放射線の発生や機器の損傷を防ぐ為に、マクロパルス を 100 $\mu$ s 以下に縮めた状態で運転している。

エネルギー回収効率は、(1) コアモニタによる電流波形、(2) ビームダンプ (ファラデーカップ) 電流値、(3) RF 入力 (amp fwd) の波形から求めることができる。しかしながら、コアモニタは電子ビームの通る位置、または、空間プロファイルによって波高が変化するので精密な電流値測定には適さない。また、現状では、ビームダンプ電流も正確に測定できていない。これは、ダンプエネルギーが 2.5MeV と小さいため、ファラデーカップ表面からの 2 次電子放出が無視できないためである。そこで、これまでは、RF 入力波形からエネルギー回収効率を求めている。なお、ビームダンプは改造を予定しており、電流測定の精度を向上させる予定である。

図 2 は、エネルギー回収を行なった時の主加速器出口でのコアモニタで測定した電流の時間波形である。加速、減速のバンチが確認できる。われわれの装置では、バンチ間隔 (96ns) と周回時間 (133ns) が同程度なので、周回後のバンチは後続バンチの直後に減速される様子が示されている。図 3 は、主加速器 (1 台目) の RF amp からの Fwd 波形のビームロードの部分拡大したものである。エネルギー回収を行なわない場合 (w/o ER) では、ビームロードに対応した RF 入力が見られるが、エネルギー回収あり (w/ ER) ではビームロードがほぼキャンセルされている。つまり、ほぼ 100% のエネルギー回収が行なわれていると考えられる。なお、この時のビー

<sup>1</sup> E-mail: hajima@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

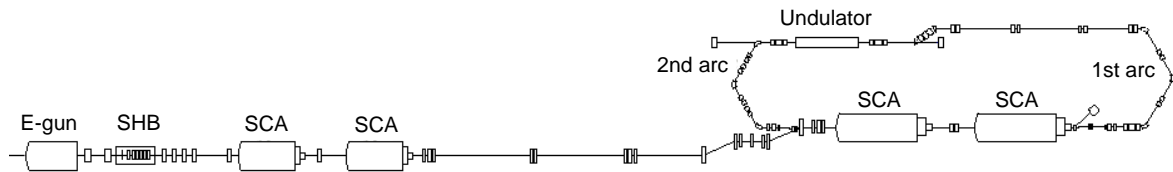


図 1: 原研 ERL の構成

ムダンプ電流値は入射電流の 80% 程度に留まっている。電流が正しく測定できていない可能性がありダンプの改造を準備している。

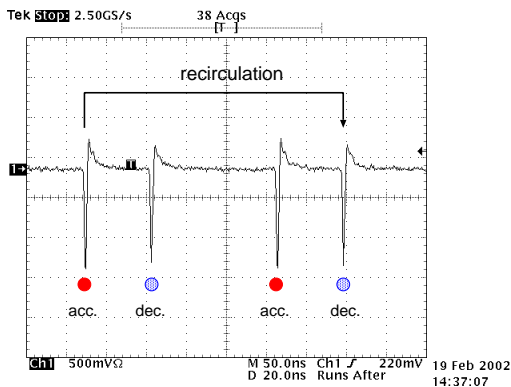


図 2: 主加速器出口の電流波形

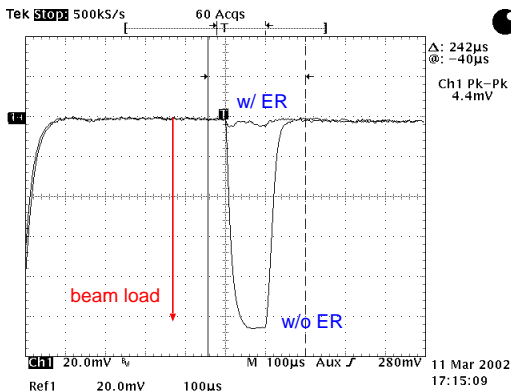


図 3: RF amp fwd の波形 : エネルギー回収なし (w/o ER) とエネルギー回収あり (w/ ER)

#### 4. beam optics の最適化とビーム軌道のモデリング

今後、エネルギー回収の安定的な運転から FEL 発振実験へと進むためには、beam optics の最適化が必要である。ところが、原研 ERL は、既存のリニアックを拡張して製作したために、素性の異なる複数種類の偏向磁石、四極磁石が混在しており、これが beam optics の

調整を困難にしている。そこで、われわれは、計算機上にビーム軌道のモデルを構築し、モデルの示す beam optics を参照して実機の磁石パラメータを決定し、実験結果を feedback しながらモデルの修正を繰り返すことを考えている。モデルの修正パラメータとしては、磁石の励磁特性、フリンジフィールド補正係数、有効長などである。これを繰り返すことで、最終的には、正しいモデルの構築と最適な beam optics が得られると期待される。

現在、代表的な beam optics code である TRANSPORT [4] を用いてビーム軌道モデルの作成を行なっている。この作業においては、加速空洞の取り扱いが重要な意味をもつので、次節で簡単に触れておく。

#### 5. 加速・減速ビームの同時収束

ビーム軌道のモデル作成のために避けて通れないのが、リニアックのモデル化である。また、リニアックにおけるビームの横方向収束特性は大電流 ERL 開発における重要な研究課題でもある。これは、リニアックにおける横方向の収束特性が HOM 不安定性 (ERL の上限電流を決める) と密接に関係しているからである citeHOM-instability。

リニアックにおける横方向の収束は、リニアック (空洞) 自身が持つ収束効果とリニアック中に設置した Q 磁石によってもたらされる。J.Rosenzweig らの理論解析によると、“pure  $\pi$ -mode” の定在波型リニアックで on-crest の加速を行なう場合、入口 / 出口の fringe field を含んだ R-matrix は [6]

$$\begin{pmatrix} \cos(\alpha) - \sqrt{2} \sin(\alpha) & \sqrt{8} \frac{\gamma_f}{\gamma_i} \sin(\alpha) \\ -\frac{\gamma_f}{\sqrt{8} \gamma_i} \sin(\alpha) & \frac{\gamma_i}{\gamma_f} [\cos(\alpha) + \sqrt{2} \sin(\alpha)] \end{pmatrix}$$

$$\alpha \equiv \frac{1}{\sqrt{8}} \ln(\gamma_f / \gamma_i)$$

と与えられる。 $\gamma' = (\gamma_f - \gamma_i) / L$  は平均加速勾配、 $\gamma_i$ 、 $\gamma_f$  は空洞の入口、出口の電子エネルギーである。

原研 ERL は、2 台の 5cell 空洞が Q-doublet を挟んで並んでおり、2.5MeV 9.3MeV 17MeV と加速され、逆に減速される。上式にしたがって、加速における 2 台の空洞の R-matrix を求めると、

$$R_{(2.5MeV \rightarrow 9.3MeV)} = \begin{pmatrix} 0.268 & 0.894 \\ -0.210 & 0.395 \end{pmatrix}$$

$$R_{(9.3MeV \rightarrow 17MeV)} = \begin{pmatrix} 0.703 & 1.44 \\ -0.0556 & 0.718 \end{pmatrix}$$

となる。同様に、減速における R-matrix は

$$R_{(17MeV \rightarrow 9.3MeV)} = \begin{pmatrix} 1.23 & 2.46 \\ -0.0955 & 1.20 \end{pmatrix}$$

$$R_{(9.3MeV \rightarrow 2.5MeV)} = \begin{pmatrix} 1.35 & 3.05 \\ -0.727 & 0.903 \end{pmatrix}$$

となる。なお、ここで求めた 5cell 空洞の R-matrix を PARMELA の結果と比較したところ、10% 以内の精度で一致することを確認している。(PARMELA は空洞の電界分布を含んだ詳しい計算が可能だが、時間がかかるので、加速器の運転支援を目的としたモデリングには向かない。)

さて、5cell 空洞の R-matrix を同じ長さの自由空間 ( $L = 1.5m$ ) の R-matrix

$$R_{(drift)} = \begin{pmatrix} 1 & 1.5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

と比べると次のことがわかる。(1) 加速(減速)に伴う横方向位相空間の収縮(膨張)のために、 $R_{11}$ 、 $R_{22}$  が変化する、(2) 加速(減速)においては空洞の見かけの長さ縮む(伸びる)、(3) 加速・減速ともに収束レンズの効果がある ( $R_{12} < 0$ ) が、エネルギーが小さい時を除いてその効果は小さい。

以上の結果をふまえて、原研 ERL における加速・減速中の横方向収束特性を調べるために、TRANSPORT に J.Rosenzweig の定在波型空洞のモデルを組み込んで計算を行なった。図 4 は、加速、減速におけるベータatron関数の計算例である。これらの結果を用いて beam optics の最適化を行なうとともに、大電流化に向けた HOM 不安定性の解析を進めている [7]。

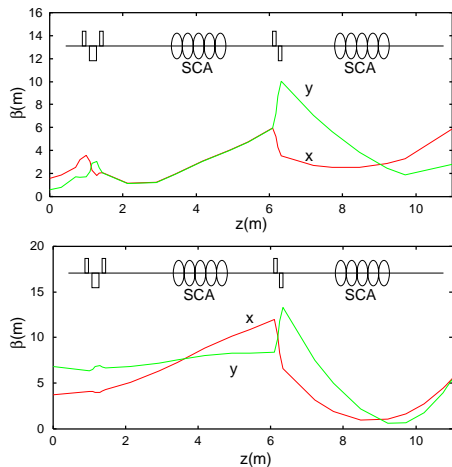


図 4: 加速におけるベータatron関数(上)と減速におけるベータatron関数(下)の計算例。入口の Q-triplet は減速ビーム (17MeV) にはほとんど効かない。空洞間では、加速・減速ビームともに同じエネルギーとなるので、この位置の Q-doublet は両ビームに同様に作用する。

## 6. 10kW upgrade

原研 FEL では、エネルギー回収なしで 2.3kW の発振を得ているので、エネルギー回収によってさらに大きな出力の FEL 発振を目指している。当面の目標は 5kW、そして 10kW である。

ところで、エネルギー回収を行なうことによって主加速器の RF パワーを一定に保ったままビーム電流を増やすことが可能になるわけだが、入射部ではエネルギー回収されないの、ビーム電流の増加に対応した RF 源の増強が必要になる。

入射部の前段加速器に RF を供給するアンプは、現在、6kW×2 である。これを 40kW×2 に増強し、8 倍のビーム電流 (40mA) が入射可能なシステムへの改造を予定している。新しい RF 源は klystron-IOT を採用することにし、既に 1 台が納入済、もう 1 台も今年度中に納入予定である。

電子銃のグリッドパルサーについても、現在の 10.4MHz のシステムからさらに高い繰り返し可能な新しいパルサーの開発を進めている。既に、2 倍の繰り返し (20.8MHz) までは、off-line で動作確認が完了している。

また、ERL の大電流化には HOM 不安定性の克服が重要な課題である。これまでに開発された ERL の平均電流は 5mA (TJNAF/IR-demo と JAERI-FEL) が最大であり、HOM 不安定性の閾値よりも低い電流値である。われわれの目標 40mA を達成するには HOM 不安定性への十分な検討と対策が必要であろう。HOM 不安定性解析コードの開発と HOM 特性の測定を進めている [7]。

以上の研究開発を進めることにより、ビーム電流 40mA で 5kW FEL の実証を行ない、さらに、光共振器の改良などを経て 10kW FEL 出力を達成したいと考えている。

## 7. まとめ

原研 FEL では、エネルギー回収型リニアック (ERL) の開発を進めている。これまでに、ほぼ 100% のエネルギー回収を確認し、さらに安定な動作と FEL 発振を目指して、周回軌道のモデル作成、beam optics の最適化を進めている。また、10kW FEL を目指した入射部の増強と大電流 ERL の実現に必要な HOM 不安定性の解析と実験も開始した。

## 参考文献

- [1] 羽島良一, 放射光, Vol. 14 (2001) 322-329.
- [2] Proc. 24th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, SPring-8, May 2002.
- [3] R.Hajima et al., Nucl. Instr. and Meth. A445 (2000) 384-388; T.Shizuma et al., Nucl. Instr. and Meth. A475 (2001) 569-573; R.Hajima et al., Proc. EPAC-2000, 1033-1035; T.Shizuma et al., Proc. EPAC-2000, 1074-1076.
- [4] D.C.Carey et al., FERMLAB-PUB-98/310 (1998).
- [5] L.Merminga, Nucl. Instr. and Meth. A483 (2002) 107-112.
- [6] J.Rosenzweig and L.Serafini, Phys. Rev. E49 (1994) 1599-1602.
- [7] 沢村勝 他, 「エネルギー回収型 FEL の HOM 特性」, 本論文集.