

[12D-03]

DESIGN OF AN ENERGY-RECOVERY BEAM LINE FOR THE JAERI FEL

T. Shizuma^{*)}, R. Hajima and E.J. Minehara

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

The JAERI free electron laser facility has been constructed to produce a far infrared laser with quasi-CW operation. So far, an average output power of 1.7 kW has been achieved. For increasing the output power, energy-recovery experiments are planned. In this paper, the conceptual design of the energy-recovery transport is described. The transversal and longitudinal beam dynamics is studied with the beam simulation codes of PARMELA, TRANSPORT, TRACE3D. The detailed simulated performance of the energy-recovery transport is shown.

原研 FEL におけるエネルギー回収輸送系の設計

1. はじめに

原研では、超伝導加速器を用いた高出力自由電子レーザー (FEL) の開発を進めており、2000年2月に、遠赤外波長領域で準平均出力 1.7kW のレーザー発振に成功した [1]。今後、より高いレーザー出力を目指し、エネルギー回収実験を行う予定である。この計画では、FEL 発振に使用した電子ビームを周回させ、超伝導空洞の減速位相へ再入射し、電子ビームのエネルギー回収を実現する。したがって、あらたに rf 源の補強なしに、より高い平均電流の電子ビームを加速でき、FEL 平均出力の向上が可能となる。

本報告書では、エネルギー回収用ビームラインの基本設計、および、電子ビーム軌道シミュレーションの計算結果について述べる。

2. 基本設計

2.1. 入射系ビームライン

入射系ビームラインは、大きく 3 つのセクションに分けることができる。1 つ目は、電子銃、83.3MHz サブ・ハーモニック・バンチャー (SHB)、および、500MHz 超伝導前段加速器 2 台から構成される部分で (図 1)、これまでの実験で使用されてきたものと同じ構成である。ここでは、電子銃により電子ビームを 230keV まで加速し、SHB でエネルギー変調を与え、前段加速器において最大 2.9MeV まで加速する。電子銃と SHB の間に 2 台のソレノイド、SHB から前段加速器までに合計 13 台のソレノイドを設置し、ビーム

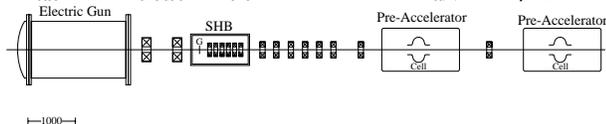


図 1: 電子銃から前段加速器までのレイアウト。

エンベロープの最適化、および、横方向エミッタンス増大の補償を行う。また、初期バンチ長 0.8ns (半値幅)、電荷量 0.6 nC 程度の電子パルスに対して、前段加速器空洞入口で最適な縦方向の位相パラメータが得られるように、SHB ギャップから最初の前段加速器空洞までの距離を決定した。

入射系ビームラインの 2 つ目のセクションは、ビームマッチング用で、建物の構造上 10m 程度の長さが必要となる。ここには、2 台の 3 連四極電磁石、および、1 台の 2 連四極電磁石が設置される。

3 つ目は、マグネティック・バンチャで、入射ビームと周回ビームを合流させるために必要となる。バンチャを通過する際に、電子ビームの質の劣化を最小限に抑えるために、ここで使用するバンチャは、次の条件を満たす必要がある: (1) アクロマティック (2) 対称、もしくは、反対称の電磁石ラティス構成 (3) 小さな偏向角。特に、最後の 2 つの条件は、コンパクトな電磁石ラティスを構成する上で重要であり、3 節で議論するが、空間電荷による水平方向エミッタンスの増大を最小限に抑えることができる。したがって、今回の設計では、最もコンパクトな電磁石ラティス構成が可能な 2 段はしご段バンチャ (図 2) を採用した。偏向角は 22.5 度、周回ビームラインからのオフセット値は $35 \times 2 = 70 \text{ cm}$ で、 $R_{56} = -0.34 \text{ m}$ である。2 段はしご段では、2, 3 番目の偏向電磁石横の単連四極電

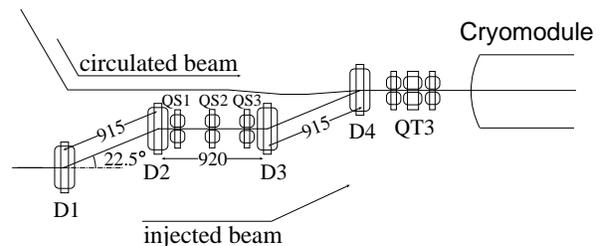


図 2: 2 段はしご段のレイアウト。

^{*)}T. Shizuma, shizuma@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

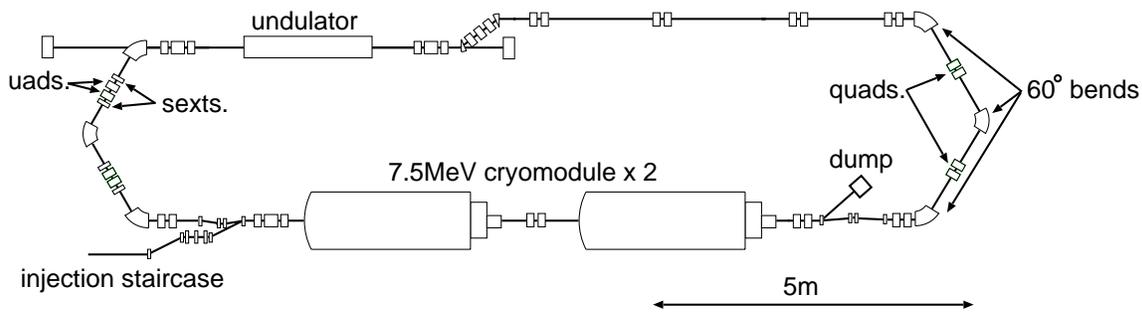


図 3: 周回ビームラインのレイアウト。

磁石 (QS1, QS3) によりアクロマティックを実現する。また、中央の単連四極電磁石 (QS2) で、2 段はしご段出口での横方向ビームパラメータを最適化する。

2.2. 周回ビームライン

周回ビームラインを設計する上で、重要なポイントを以下にまとめた。

- ・周回ライン全体を通して適切なビームサイズ
- ・アクロマティックかつアイソクロナス
- ・大きなエネルギーアクセプタンス
- ・遷移行列の高次項の最小化
- ・周長可変
- ・コンパクトかつ拡張性

図 3 に、エネルギー回収用周回ビームラインの概念図を示す。加速器室の床面積、および、コストの面から、最初の 180 度アークは現在のものを転用し、同様な構成のものを 2 番目のアークで採用した。ただし、アンジュレ タ内で FEL 相互作用した電子ビームは、そのエネルギーが大きく広がるため、2 番目の 180 度アークでは、ダクト径を大きくとり ($\phi 70\text{mm}$)、エネルギーアクセプタンスを大きくした。また、エネルギー広がりが大きく、遷移行列の 2 次の項の影響が無視できなくなるため、アーク中に六極電磁石を加え T_{166} , T_{266} , T_{566} を最小化した。さらに、周回ビームを適切な減速位相で、主加速器へ再入射するために、行路長の調整が必要となる。今回の設計では、2 番目の 180 度アーク全体を動かすことで、行路長の調節を行う。60 度偏向電磁石 3 台、四極、六極電磁石 2 セットを、それぞれ独立の架台に置き、 $10\mu\text{m}$ (rf 位相で 0.012 度に相当) の精度で最大 150mm (rf 半波長分) の行路長調整が可能である。周回ビームラインのより詳細な議論については、文献 [2] を参照していただきたい。

3. 設計性能

前節のエネルギー回収用入射系、周回ビームラインについて、PARMELA[3]、TRANSPORT[4]、TRACE 3D[5] を用いて、電子ビームの軌道計算を行い、ビームラインの性能を評価した。

3.1. 入射系ビームライン

図 4a に、電子銃から前段加速器入口までの横方向

ビームエンベロープを示している。入射系のこの部分では、電子ビームエネルギーが 230 keV と小さいため、空間電荷による影響を受けやすく、横方向エミッタンス増大に留意しなければならない。空間電荷によるエミッタンス増大の中では、linear space charge によるものが特に重要で [6]、原研の入射系の場合、エミッタンス増加量は、前段加速器手前で $\Delta\epsilon_{\text{rms}}^n = 20\pi$ mm-mrad 程度と推定される。この値は電子銃位置での初期エミッタンスと同程度で無視できない量であるが、linear space charge によるエミッタンス増大は、ソレノイドを適当な位置に設置することで補償できることが知られている [7]。図 4b に、PARMELA によるエミッタンスの解析結果を示す。最初の 4m までは、ソレノイドを用いて、なるべく平行にビームを輸送することでエミッタンス補償を完全に行うことができる。一方、前段加速器手前のソレノイド位置で、エミッタンス増大が顕著になる。ここでの増加量は、ソレノイドから前段加速器位置までの距離で決まることから、前段加速器手前のソレノイドは、できるだけ前段加速器へ近づけなければならない。表 1 に、PARMELA の計算で用いた初期ビームパラメータをまとめた。

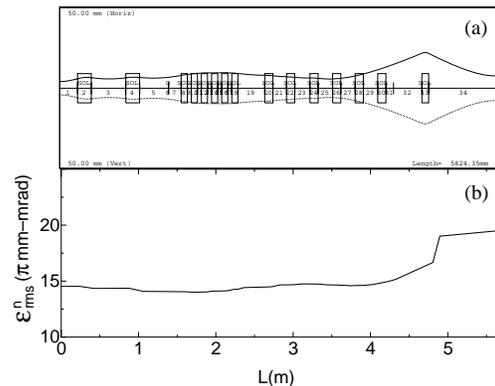


図 4: TRACE3D による電子銃から前段加速器入口までの水平および垂直方向のビームエンベロープ (a)。PARMELA による横方向規格化 rms エミッタンス (b)。

PARMELA の計算では、前段加速器入口で、規格化エミッタンス $\epsilon_{x,y}^{n,\text{rms}} = 20\pi$ mm-mrad となり、rf 位相を適切に選ぶことで、前段加速器出口でもこの値を保持できることが分かった。また、この値は、前段加

表 1: 電子銃出口でのビームパラメータ

Accelerated voltage	230 kV
Charge per pulse	0.6 nC
RMS pulse width	0.34 ns
RMS beam radius	1.6 mm
Normalized RMS emittance	14 π mm-mrad

速器下流でのエミッタンス実測値とよく一致することも確認できている。

電子ビームは、前段加速器において、2 MeV 以上まで加速されるため、linear space charge によるエミッタンスの増大は無視できるようになり、距離 10m のマッチングセクションでもエミッタンスの増加はほとんどない。しかしながら、2 段はしご段において、再び、空間電荷によるエミッタンス増大が生じる。2 段はしご段の最初の偏向電磁石を通過した後、電子ビームは空間電荷によりエネルギー変化を受ける。その結果、2 番目以降の偏向電磁石出口で偏向角エラーを生じ、水平方向のエミッタンスが増加する [6]。このエミッタンス増加は、2 段はしご段入口で、水平方向をビーム waist で入射することで最小化でき、PARMELA の計算では、2 段はしご段入口で $\epsilon_{x,y}^{n,rms} = 20 \pi$ mm-mrad、出口で $\epsilon_x^{n,rms} = 29$, $\epsilon_y^{n,rms} = 22 \pi$ mm-mrad となった。

また、2 段はしご段での縦方向のビームダイナミクスについても、PARMELA を用いて解析を行った。2 段はしご段の R_{56} 値は -0.34 m で、前段加速器 2 番目の rf 位相の調整で、2 段はしご段入口で最適な縦方向位相パラメータが得られる。図 5 に、主加速器入口での縦方向位相空間図を示しており、rms パンチ長 $\sigma_t = 7$ ps, rms エネルギー広がり $\Delta E/E = 0.4$ % (@2.6 MeV) が得られることが分かった。

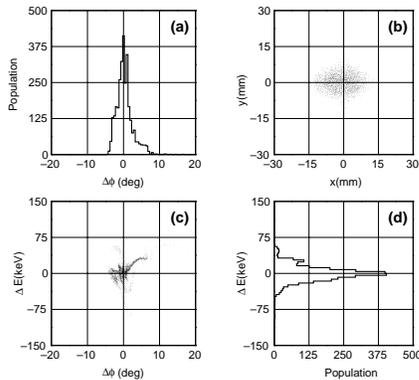


図 5: 主加速器入口での縦方向位相空間図。

3.2. 周回ビームライン

図 6 に、TRANSPORT による周回ビームラインでのビームエンベロープとエネルギー分散関数を示している。全体を通して、ベータの値は 10m 以下と十分小さいことが分かる。1 番目、2 番目の 180 度アークともに、偏向電磁石間の四極電磁石を用いて、1 次のオーダーでアクロマティックかつアイソクロナスを実現する。さらに、FEL 相互作用後の電子ビームは、エネ

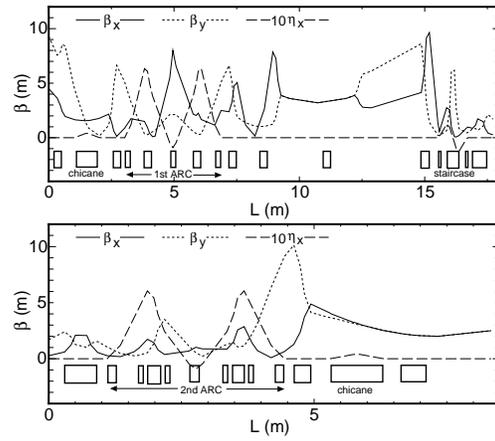


図 6: 主加速器出口からアンジュレタ入口まで(上)とアンジュレタ出口から主加速器入口まで(下)のビームエンベロープとエネルギー分散。

ルギー広がりが大きくなるため、2 番目の 180 度アークでは、四極電磁石の両側に設置した六極電磁石により、 T_{166} , T_{266} , T_{566} の項を完全に補正する。また、エネルギー分散は、180 度アーク中の四極電磁石位置で最大値 $\eta_x = 0.59$ m をとり、エネルギーアクセプタンスは、この位置でのダクト径で決まる。したがって、1 番目の 180 度アークでは、ダクト径 $\phi 50$ mm で、エネルギーアクセプタンス 8%、2 番目の 180 度アークでは、エネルギーアクセプタンス 12% (ダクト径 $\phi 70$ mm) となる。

また、ここでの電子ビームのエネルギーは、約 16 MeV で、3.1 節で議論した空間電荷によるエミッタンス増大は無視できる程度となる (空間電荷の効果は γ^{-2} に比例するため)。一方、180 度アークの偏向電磁石内では、coherent synchrotron radiation (CSR) によるエネルギー変化が生じ、エミッタンスが増大する。1 番目のアークでの CSR の影響を elegant [8] を用いて見積もると、アーク入口で水平方向規格化エミッタンス $\epsilon_x^{n,rms} = 29 \pi$ mm-mrad の場合、出口で 40π mm-mrad へ増加することが分かった。しかしながら、この程度であれば FEL 発振には大きな影響を与えないと思われる。

参考文献

- [1] N. Nishimori et al., in these proceedings.
- [2] R. Hajima et al., NIMA445(2000) 384.
- [3] L.M. Young, LA-UR-96-1835(1997).
- [4] D.C. Carey, K.L. Brown and F. Rothacker, FERMILAB-Pub-98/310.
- [5] K.R. Crandall and D.P. Rusthoi, LA-UR-97-886(1997).
- [6] B.E. Carlsten et al., PRE51(1995)1453.
- [7] B.E. Carlsten, NIMA285 (1989)313.
- [8] M. Borland, <http://www.aps.anl.gov/asd/oag/oaghome.shtml>