

DESIGN OF AN INJECTOR FOR THE ERL TEST FACILITY

Ryoichi Hajima^{1*}, Ryoji Nagai¹, Hokuto Iijima¹, Tomohiro Nishitani¹, Nobuyuki Nishimori¹,
Satoshi Ohsawa², Shogo Sakanaka³, Tsukasa Miyajima³

¹Japan Atomic Energy Agency, ERL Development Group
Tokai, Ibaraki 319-1195

²High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

³High Energy Accelerator Research Organization, Institute of Materials Structure Science
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

Research and development towards an ERL light source is conducted by collaboration team of JAEA and KEK. In this paper, we present a design study of an injector for the ERL test facility, where critical technologies required for a future ERL light source will be demonstrated. Using a particle tracking simulation in combination with optimization routines, we can find an optimum design to produce an electron beam of 0.1 mm-mrad emittance.

ERL 実証機のための入射器の設計

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) の技術に基づく放射光源は、コヒーレント X 線、フェムト秒 X 線を多数のユーザーに同時に供給できることから、第 3 世代光源 (SPring-8) を超える次世代放射光源として期待されており、この実現を目指した研究開発が欧米で始まっている [1] [2][3]。日本国内においても、日本放射光学会を中心に次世代放射光源の検討が続けられており、先端的リング光源としての ERL 放射光源への期待が高まりつつある [4]。

日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、2006 年 3 月に研究協力協定を締結し、ERL 型次世代放射光源に向けた R&D を共同で実施することとなった。東大物性研、分子研、JASRI などからも研究者の参加を得て、加速器の構成要素毎にワーキンググループが組織され、R&D 活動が始まっている [5]。ERL 放射光源の実現には、高輝度大電流を生成する電子銃、CW 動作で大電流を加速可能な超伝導空洞といった固有の要素技術開発が必須である。本 R&D では、まず最初に、これらの要素技術開発を行い、続いて実証機 (小型 ERL) での総合試験を行った後に、ERL 放射光施設の建設に進むことにしている。実証機は KEK サイト内の冷中性子実験棟に建設の予定である。

本稿では、ERL 実証機 (ERL Test Facility) の入射器設計について報告する。

2. ERL 実証機のための入射器

ERL 放射光源に必要な要素技術の一つである、高輝度大電流電子銃については、NEA(negative electron affinity) 表面をもつ光陰極を備えた DC 電子銃の開発が JAEA で進んでいる [6][7] [8]。この方式は、偏極電子源 (CE-BAF)、高出力自由電子レーザー (JLAB-FEL) で使用されており、平均電流 10 mA、寿命 $2 \times 10^5 C/cm^2$ が得られている。また、エミッタンスについても低電流では 0.1 mm-mrad が達成されている。これらの実績をベースにして、新しい工夫 (超格子陰極の採用など) を組み合わせることで、ERL 放射光源が要求する性能 (100 mA、0.1 mm-mrad) が達成できると考えている。

DC 電子銃の加速電圧は 250-750 kV であり、主加速器に直接入射するにはエネルギーが低すぎる。また、空間電荷力などで容易にエミッタンス増大が起こってしまう。したがって、5-15 MeV 程度に加速すると同時にエミッタンス増大を適切に補償した後に、主加速器に入射する必要がある。また、入射ビーム (低エネルギー) と周回ビーム (高エネルギー) を同一軌道に重ね合わせるための合流部 (merger) として、偏向磁石を組み合わせたアクロマティック輸送系が必要である。これらを含めた入射器全体の構成例を図 1 に示す。

入射加速器は、最大で 100 mA の電子ビームを CW で 5-15 MeV まで加速するものであり、加速ビームパワーは 1 MW 以上にもなるため、大電力 RF カップラー、効率的な HOM 取り出しなどが解決すべき課題となる。空

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

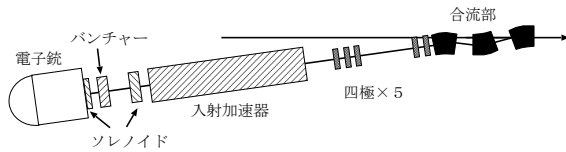


図 1: ERL 実証機の入射器の構成.

洞の種類としては、超伝導と常伝導の選択肢がある。常伝導リニアックでは、動燃で 200 kW ビームパワーの装置 (10 MeV, 100 mA, 20% デューティー) が開発された例がある。空洞の発熱は加速勾配の 2 乗に比例するので、CW 運転を行うには加速勾配を低く設定する必要があり、動燃では、1.2 MV/m と小さな値を設定している [9]。超伝導リニアックを用いる場合は、加速勾配を大きくとれるが、大電力に耐える RF カップラーの開発が課題である。最近、CPI 社から 75 kW (1.3 GHz) のカップラーがカタログ製品として入手できるようになり、実現のめどがたった。なお、CPI 社の製品は Cornell ERL 用に開発されたものである。本稿では、超伝導リニアックを入射器に採用する方式で設計を行う。

3. エミッタンス増大とその補償

XFEL 用の光陰極 RF 電子銃では、横方向空間電荷力と時間依存 RF 場によるエミッタンス増大が問題になるが、ソレノイド磁石を用いることにより、これらのエミッタンス増大を補償 (抑制) できることが知られている。これは、位相空間 ($x-x'$) における蝶ネクタイ状の変形 (パンチスライス毎の異なる発散力に起因する) に伴うエミッタンス増大が、ソレノイド磁場で補償できることを意味している。これは、ERL 入射器でも同様である。

ERL 入射器の合流部では、縦方向空間電荷力によるエミッタンス増大も存在する。これは、周回軌道における CSR の効果と同様で、水平分散がある軌道で生じたエネルギー変化により、位相空間 ($x-x'$) でパンチスライスが一方向にずれるような変形を行い、エミッタンス増大を引き起こすと説明できる。位相空間 ($x-x'$) 上のビーム楕円の主軸 (ベータトロロン運動で決まる) とパンチスライスのずれる方向を一致させることで、エミッタンス増大を最小とすることができる [10][11]。

まとめると、ERL 入射器におけるエミッタンス増大のメカニズムには (1) 横方向空間電荷力 (入射器全体)、(2) 時間依存 RF 場 (バンチャーと入射加速器)、(3) 縦方向空間電荷力 (合流部) があり、ソレノイド磁場の最適化、合流部のエンベロープマッチングでこれらの増大を補償しなければならない。

4. 数値計算による最適設計

異なるメカニズムで生じるエミッタンス増大を入射器全体にわたって最小にするためには、複数パラメータ (収束磁場、RF 位相など) を調整しながら最適な構成を決定する必要がある。また、設計計算では空間電荷効果を取り込んだ粒子追跡計算が必要である。このような多数パラメータの最適化を含んだ粒子追跡計算では、遺伝子アルゴリズム (GA) [12]、シミュレーテッドアニーリング (SA) [13]、滑降シンプレックス [14] の有効性が示されている。

われわれは、粒子追跡計算コード PARMELA [15] に、滑降シンプレックスを用いた最適化ルーチンを追加し、ERL 入射器の最適設計を行った。電子銃電圧 500 kV、合流部エネルギー 5 MeV と選んだ場合、100 mA (77 pC x 1.3 GHz) でエミッタンス 1.0 mm-mrad、10 mA (7.7 pC x 1.3 GHz) でエミッタンス 0.1 mm-mrad とする設計が得られている (エミッタンスは合流部下流での値) [14]。10 mA の場合の最適設計の結果を図 2 に示す。電子銃直後から空間電荷によるエミッタンス増大があり、合流部は水平分散があるので x 方向のエミッタンスが大きくなっているように見えるが、72 MeV の位置 (9-cell x 5 台通過後) でエミッタンス補償が完了して、 x 方向、 y 方向ともに 0.1 mm-mrad が得られているのがわかる。

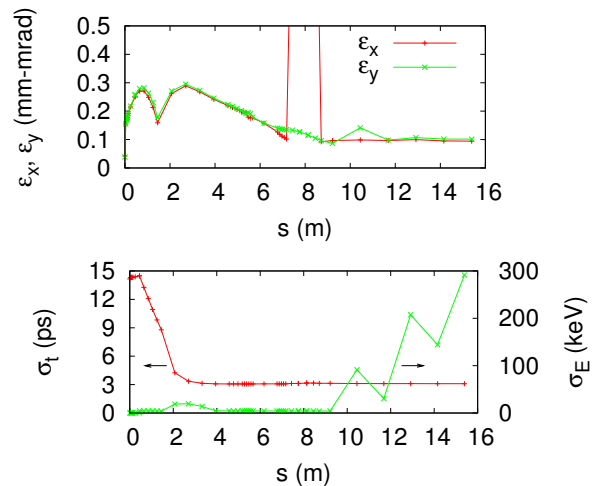


図 2: 電子銃 500kV、合流エネルギー 5MeV、電流 10mA とした時の最適設計

Cornell 大学の ERL 入射器では、電子銃電圧を 750 kV、合流エネルギーを 15 MeV まで高くすることで、100 mA で 0.1 mm-mrad とする設計解を得ている [12]。Cornell の設計では、各機器の位置やレーザープロファイルといったパラメータも可変とすることで、良い性能が得られていると思われる。複数メカニズム (空

間電荷と RF 場) に起因するエミッタンス増大を補償するには、ソレノイドに二つの自由度 (磁場、位置) を与える必要があると考えたと納得できる。

われわれの ERL 実証機では、各機器の工学設計、および、開発予算との兼ね合いで電子銃電圧、合流エネルギーに制限がある。開発スケジュールに合わせて、徐々に達成パラメータを向上させるようなシナリオを前提に、入射器の設計を進める予定である。そこで、現在、JAEA で開発中の 250kV 電子銃 (最大 50mA) を用いた場合のビーム性能を評価するために計算を行った。

入射加速器は、Cornell ERL と同様に、2-cell の超伝導空洞を 5 台並べた構成とした。以前の設計 [14] では 3-cell を採用していたが、HOM 取り出しの観点から 2-cell の方が望ましいという判断による。空洞 1 台に 2 つのカップラーを設け、最大で $50\text{kW} \times 2 = 100\text{kW}$ の RF 入力を仮定し、超伝導空洞の加速勾配は最大 10 MV/m とした。低エミッタンスモード ($7.7\text{ pC} \times 1.3\text{ GHz} = 10\text{ mA}$) と大電流モード ($38\text{ pC} \times 1.3\text{ GHz} = 50\text{ mA}$) の二つの運転モードが考えられるが、ここでは、低エミッタンスモードの計算結果のみを示す。

電子銃カソードにおける初期値として、カソード半径 0.5 mm、カソードの実効温度 35 meV、パンチ長は 14 ps (Gaussian RMS 値) とした。カソード半径とカソード温度で決まる熱エミッタンスは 0.065 mm-mrad である。5 台の空洞の加速勾配を全て 10 MV/m とし、入射加速器の入口 / 出口でパンチ長が 10 ps / 3 ps となるように、パンチャー (振幅、位相) と加速空洞 (位相) を手で調整した後、2 つのソレノイド磁場の自動最適化を行った。計算は入射加速器下流の四極磁石の手前までとし、その位置でのエミッタンスが最小となるような評価関数を指定した。最適化の様子を図 3 に示す。乱数の初期値を変えて 3 回の計算を行っている。最適化の結果、規格化エミッタンス 0.20 mm-mrad が得られた。電子エネルギーは 15.3 MeV、パンチ長は 2.7 ps である。

このとき、電子銃で生成した 250 keV のビームを、10 MV/m の超伝導空洞に入射すると、時間依存 RF 場によるエミッタンス増大が強く生じる心配がある。そこで、第 1 空洞のみ加速勾配を 3 MV/m と低い値に設定して同様の最適化を行ったところ、0.15 mm-mrad のエミッタンスが得られた。電子エネルギーは 13.5 MeV、パンチ長は 2.5 ps である。

5. まとめ

ERL 実証機のための入射器の設計について報告した。粒子追跡コードに最適化ルーチンを組み合わせること

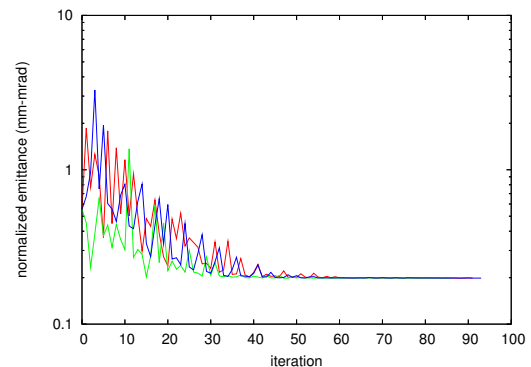


図 3: ソレノイド磁場の自動最適化 (加速勾配 10 MV/m)

で、複数のエミッタンス増大を同時に補償するような最適設計が得られることを示した。今後、各構成要素の工学設計の進捗に合わせて、実証機の設計を詰める作業を行う予定である。また、Cornell の設計と同様に、構成機器の位置関係、レーザープロファイルの最適化を行い、さらに良いビーム特性が得られる設計を探索したい。さらに、イオントラップ、ウェーク、CSR などの効果を取り入れられるような設計コードの開発も検討している。

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費基盤研究 (C) 18560806 の助成を得て行われた。

参考文献

- [1] 羽島, 放射光 14, 323-330 (2001).
- [2] <http://erl.chess.cornell.edu/>
- [3] <http://www.4gls.ac.uk/>
- [4] 次世代光源検討特別委員会・最終報告書, 日本放射光学会 (2005).
- [5] 河田洋 他, 本論文集.
- [6] 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.
- [7] 飯島北斗 他, “ERL 光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.
- [8] 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.
- [9] 長谷川信 他, サイクル機構技報, 9, 29-39 (2000).
- [10] R. Hajima, Jpn. J. Appl. Phys. 42, L974-L976 (2003).
- [11] V.N. Litvinenko, R. Hajima, D. Kayran, Nucl. Instr. Meth. A557, 165-175 (2006).
- [12] I.V. Bazarov, C.K. Sinclair, Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 034202 (2005).
- [13] 永井良治 他, 第 1 回日本加速器学会年会・第 29 回リニアック技術研究会論文集, p.420-422(2004).
- [14] R. Hajima, R. Nagai, Nucl. Instr. Meth. A557, 103-105 (2006).
- [15] J. H. Billen, Los Alamos Accelerator Code Group, LA-UR-96-1835 (2005), version 3.40.