

エネルギー回収型リニアックにおける入射部の基本設計

山崎 淳^{A)}、諏訪田剛^{B)}、梅森健成^{B)}、大沢哲^{B)}、斎藤健治^{B)}、横谷馨^{B)} 榎本収志^{B)}

^{A)}総合研究大学院大学数物科学研究科加速器科学専攻

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、次期放射光光源としてエネルギー回収型リニアック(ERL)の設計を精力的に推し進めている。本発表では入射部ラティスの設計をビームダイナミクスに基づいて議論する。本モデルの特長としては、2本の加速管を用いバンチ圧縮(バンチ長は20から2psecに圧縮)と加速を行うものである。低エミッタンスを達成するためにPARMELAによるシミュレーションを行って、具体的な設計モデルを提案する。

1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、次期放射光施設として、第四世代の放射光光源計画を検討している。現在、世界各地で建設されている蓄積リング型放射光施設では、理論上低エミッタンスの極限を達成している。これ以上に小さいエミッタンスを実現する高輝度光源として、超伝導線形加速器を基本とする ERL が検討されている。ERL のアイデア自体は、1960 年代に提案されているが、具体的に検討され始めたのは、1990 年代後半からである。

ERL の概略図を示す[1]。マルの中の番号は、電子ビームの走る道順である。

- (1) ①電子銃から電子を生成。
- (2) ②入射器、エネルギーを E_0 まで加速 (0.33~10MeV)。
- (3) ③主線形加速器で電子をエネルギー E まで加速。
- (4) ④、⑤、⑥で放射光生成。
- (5) ⑦主線形加速器で、電子をエネルギー E_0 まで減速しエネルギー回収。
- (6) ⑧減速器で十分に減速させて、⑨ビームダンプで廃棄する。

ERL の仕様としては、エネルギー5GeV、1Åの X 線の回折限界を得るために横の規格化エミッタンスは $0.1\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、エネルギー回収率は 99.9%以上を設定している。この仕様を達成するためには、新しい加速器物理、技術が必要とするため、試験研究のための加速器を作る必要がある。特に、ビーム安定性、低エミッタンスの実現、エネルギー損失、エネルギー回収率、ビームハロ生成メカニズム等が重要な問題となる。これらの問題は、従来の加速器では経験していない領域となるので、試験加速器を導入し解決しなければならない。

試験加速器は、ビームエネルギーを除き可能な限り本加速器の仕様をテストできるようにしなければならない。特に、入射部設計にはビームエネルギーの違いを省き同じ仕様を想定している。表 1 に ERL の試験加速器及び本加速器の設計仕様を示す。特に入射部のビーム性能は、ビーム品質を決定してしまうので重要な検討課題となる。

表 1. 主なエネルギー回収型リニアックのパラメータ (カッコ内は試験加速器の仕様を示す)

ビームエネルギー	2.5~5 GeV(試験器 最大 200MeV)
入射エネルギー	10 MeV(5MeV)
周長	1253 m(-)
最大電流	100mA (同左)
規格化エミッタンス	$0.1 \mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ (同左)
エネルギー幅(rms)	5×10^{-5} (-)
バンチ長(rms)	1~0.1 psec (同左) バンチ圧縮した時、ただし 主線形加速器では 2psec 以下)
加速周波数	1.3 GHz (同左)
加速勾配	10~30 MV/m (同左)

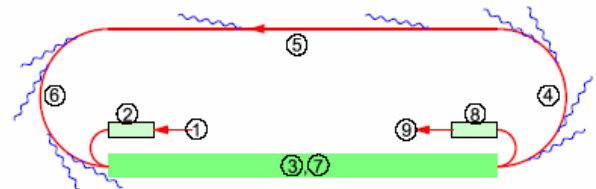


図 1 ERL の概念図

2 入射部設計概要

以下では、入射部設計の概要を議論する。電子銃の高電圧は、空間電荷によるエミッタンス増大をさけるために出来るだけ高く設定する必要がある。電子銃から出射したビームは、2台の超伝導空洞(周波数 1300 MHz)によりバンチ圧縮及び加速が行われる。平均電流は最大 100mA とする。ビームエネルギーは、電子銃からの出射エネルギーを 0.33MeV、主加速器への入射エネルギーを 5MeV とし、横の規格化エミッタンス $0.1\text{mm}\cdot\text{mrad}$ (rms) を目標値として設計を行った。

今回の設計では、電子銃から出射するビームは、直径 1mm の矩形型ビーム径とし、電子銃からの出射ビームのバンチ全長は、20psec (ガウス分布、 $\sigma=4.47\text{psec}$, 全長 4.48σ) を仮定し、初期エミッタンスとして、エネルギー拡がり、横のエミッタンスをそれぞれ零として、エミッタンス増大の効果のみが見えるようにした。平均電流は 10~100mA の場合を計算した。基本的な配置図を図 2 に、パラメータは表 2 にそれぞれ示す。以上のパラメータを使い PARMELA による粒子トラックシミュレーションを行った。

表 2. 主な設計パラメータ

入射エネルギー	0.33 MeV
平均電流	10~100 mA
ビーム径	矩形型 Φ 1 mm
バンチ全長(rms)	20psec 以下 (ガウス分布, 全長) 10mA 時 15psec 全長
ソレノイド磁石(1)	4.5 cm, 10mA 時 500gauss
ソレノイド磁石(2)	9.5 cm, 10mA 時 470gauss
ソレノイド磁石(3)	10 cm, 10mA 時 530gauss
ドリフトスペース	10cm
バンチャー	$\beta = 0.8, 10 \text{ MV/m}$ 以上, 1 セル 10mA 時 12MV/m, 初期位相 36.5 度 ^{注 1)}
加速管	$\beta = 0.9, 20 \text{ MV/m}$ 以上, 2 セル 10mA 時 32MV/m, 初期位相 97 度 ^{注 1)}

注 1) 位相 0 度をゼロクロス、進行方向をマイナスとした

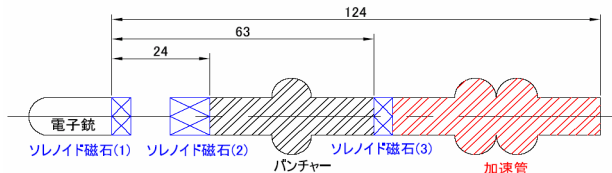


図 2. 入射部の概念図

3 設計方針

入射部を設計するにあたり以下の考えで進めた。

1. 速度変調させながらバンチ圧縮を行った[2]。スペースチャージの効果を抑制するために、バンチャーで運動エネルギーを2倍以上増加させた(0.66MeV以上)。
2. ソレノイド磁石(1),(2)ではスペースチャージによるエミッタンス成長を抑制するために磁場の大きさを決めた。この際、Serafini [3]の磁場算出方法を目安に、入射部全体で低エミッタンスが得られるように調整した。
3. 加速管出口でエネルギー5MeV、バンチ長が2psec以下になるように、バンチャー、加速管の電場、RFの位相を決めた。さらに、加速管出力部の収束力(エッジフォーカス)を利用して加速管出口直後の規格化エミッタンスが最小になるように、電場の大きさ、位相を調整した。
4. 加速管出射後の規格化エミッタンスが極小値になるようにソレノイド磁石(3)で調整を行った。

4 結果

電子銃から出射バンチは、バンチ全長でガウス分布を取るのですが、バンチ内の中央部、両端部で電荷密度に違いが生じた。ソレノイド磁石(1)を通過後、バンチ内の両端部はスペースチャージの効果が弱いので収束し、バンチ内の中央部ではスペースチャージの効果が強いので発散した。横の射影エミッタンスは位相空間上でバタフライ型を取り、縦のエミッタンスはS字型に変形した(図3)。ドリフトスペースを進行中に、バンチ内の中央部のビーム径は増大し、

両端部では減少した(図4)。ソレノイド磁石(2)の入射直前では、バンチ内の粒子分布は、ガウス型から矩形型に変化するため、電荷密度が一様となった。バンチャー出射直後は、電荷密度が一様であり、バンチ全体でビーム径が増大すると同時に、RF電場の非線形部の効果で、縦のエミッタンスは直線形となりバンチ圧縮が起こった(図5)。ソレノイド磁石(3)(図6)を出射後、加速管入口でのエッジフォーカスの影響によりビームは収束し、加速管出口付近でビーム径は収束から発散に変化した(図7、図9)。加速管出射後横のエミッタンスは、大きく減少した。10mAでは、0.1mm•mrad以下を得た(図8,9)。縦のエミッタンスは、S字から直線的な形状でいったん減少した後、バンチ圧縮によるエネルギー分散(図10)の増大で縦のエミッタンスは増加した(図11)。加速管通過中にバンチ圧縮(図12)はさらに進行するが、エネルギーの大幅な増加によりエネルギー分散が減少するとともに、縦のエミッタンスも減少を示した。

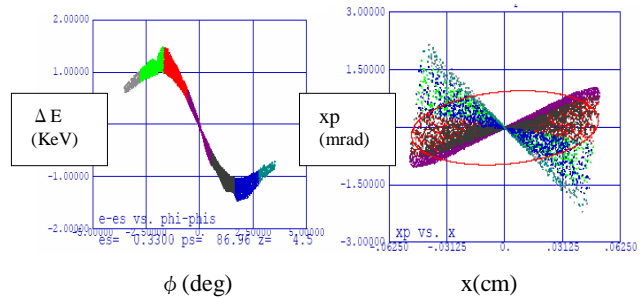


図 3 ソレノイド磁石(1)出口の縦、横の位相空間(10mA)

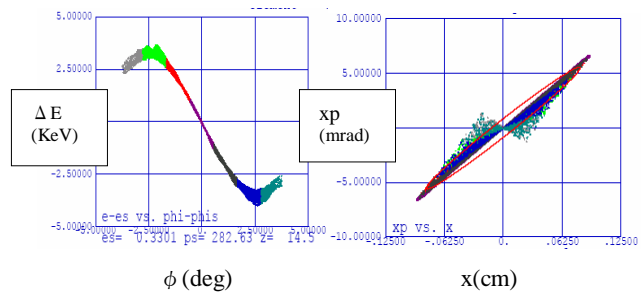


図 4 ソレノイド磁石(2)入口の縦、横の位相空間(10mA)

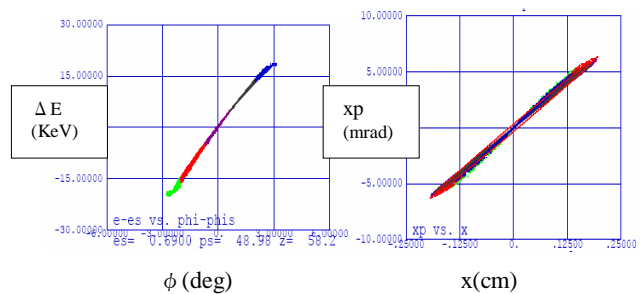


図 5 バンチャー出口の縦、横の位相空間(10mA)

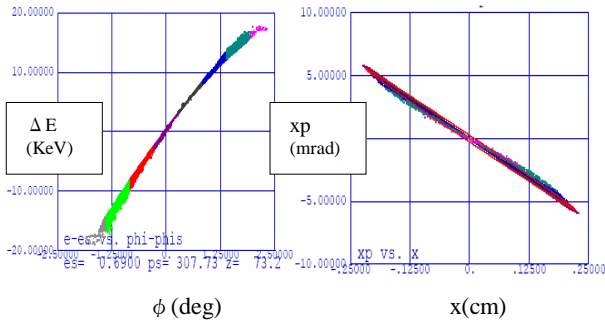


図6 ソレノイド磁石(3)出口の縦、横の位相空間(10mA)

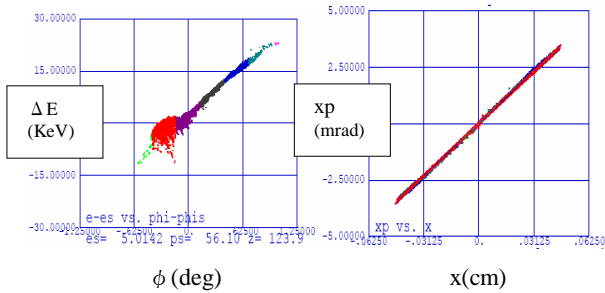


図7 加速管出口の縦、横の位相空間(10mA)

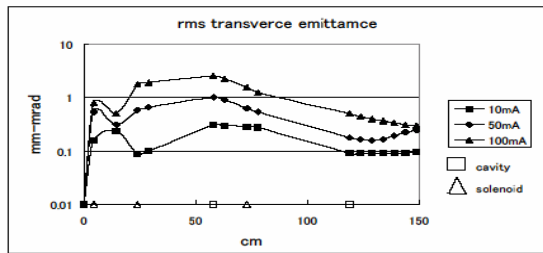


図8 横方向の規格化エミッタンス(rms)

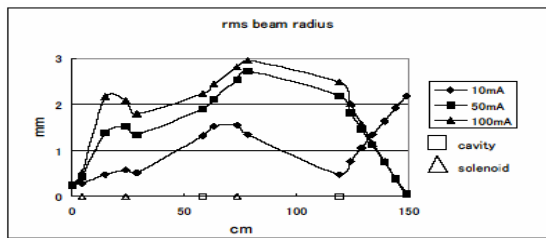


図9 ビーム半径(rms)

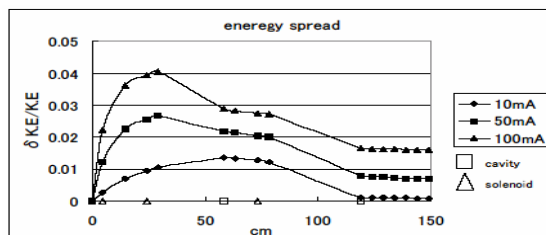


図10 エネルギー拡がり

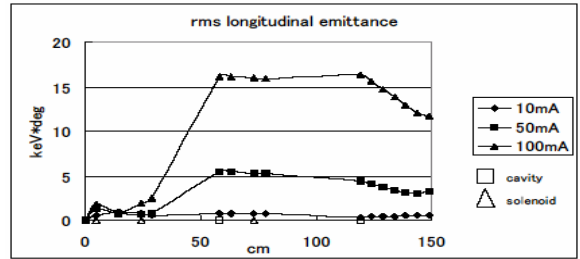


図11 縦方向の規格化エミッタンス(rms)

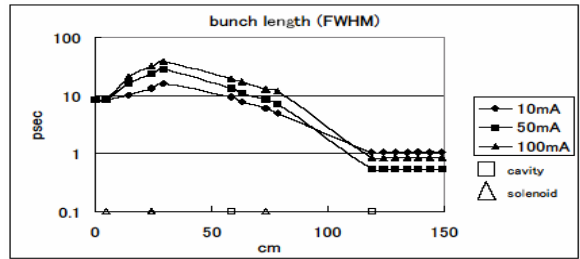


図12 バンチ幅(FWHM)

5 今後

ERL 試験加速器における入射部ラティスの設計をビームダイナミクスに基づいて検討した。その結果、目標の $0.1\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の規格化エミッタンスが得られるビーム電流の上限値は、今回のモデルでは 10mA であることがわかった。電流値を 100mA にすると、エミッタンスは $0.3\text{mm}\cdot\text{mrad}$ となり現状のモデルでは満足しない。これは、バンチ圧縮中にバンチ粒子の大部分が前方に集中して後方で低密度となり、エミッタンス劣化を招くと考える。今後の検討としては、バンチ幅、バンチャーの周波数、バンチャーと加速管パラメータを変化させ、バンチ圧縮中にバンチ内粒子の密度分布が一定となるようにパラメータを調整する必要があると考える。同時に今回考慮に入れなかったウェークの効果も検討し、エミッタンス増大への影響、ビームハロの発生等の問題を取り入れて最適化を目指す。

参考文献

- [1] K.Yokoya, OHO2003, Tsukuba, 25-28, August,2003
- [2] H.Iijima, *et al.*, Proceedings of the 28th Symposium of Linear Accelerator Technology, Tokai, July.30-August.1, 2003
- [3] L.Serafini, J.B.Rosenzweig, *Phy.Rev. E* 55.7565,1997
- [4] CHESSTechnical Memo 01-003 JLAB-ACT-01-04,4,July, 2001
- [5] Study Report on the Future Light Source at the Photon Factory, KEK,2003