

ERL 放射光源のための full-DC 入射器の提案

羽島 良一¹、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

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) を用いた放射光源は、サブピコ秒の高輝度 X 線を生成できることから、次世代放射光源として大きな期待が寄せられている。われわれは、商業ベースで実用化されている大出力 DC 加速器 (Dynamitron) を使った ERL 入射器を提案し、性能の評価を行なった。ERL 放射光源で要求される電子ビーム (バンチ長 ~ 3 ps、規格化エミッタンス ~ 2 mm-mrad) が生成できることがわかり、また、buncher-booster で部分的なエネルギー回収を行なうことで、RF カップラーの負荷を 10kW 以下まで低減できることがわかった。

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) を用いた放射光源は、サブピコ秒のパルス幅を持ち、回折限界に迫る高輝度 X 線を生成できることから、次世代放射光源として大きな期待が寄せられている [1]。ERL 放射光源の開発競争は、今、まさに始まりつつあるところであるが、解決すべき大きな課題の一つが大電流 CW 入射器である。これまでに、二つの方式の入射器: L-band 超伝導リニアックと L-band 常伝導リニアックが提案されている。

超伝導リニアックを用いる設計では、1.8K の超流動ヘリウム温度に対応した大出力 RF カップラーの実現が大きな技術的障壁である。例えば、平均電流 100mA、入射エネルギー 5MeV を得るには 500kW の RF パワーが必要であり、入射加速器を 5 つの cavity に分割しても 100kW のカップラーパワーになる。これは、TTF の設計値: $208\text{kW (peak)} \times 6.65\% \text{ (duty)} = 1.4\text{kW (ave.)}$ に比べると 2 桁大きな値であり、カップラーの基本設計からやり直す必要がある。また、常伝導リニアックを用いる設計では、CW 動作時の空洞の熱負荷が大きな問題であり、やはり、簡単には実現できそうにない。

ところで、大出力の電子加速装置としては、DC 加速器が商業ベースで実用化されている。100kHz 程度の RF を使って充電を行なう Dynamitron 型の DC 加速器は、100kW クラスの装置が照射滅菌などを目的とした産業利用に供されている [2]。われわれは、この大出力 DC 加速器を使った ERL 入射器を提案し、性能の評価を行なった。PARMELA によるビームダイナミクス解析の結果、ERL 放射光源で要求される電子ビームが生成できることがわかり、また、buncher-booster で部分的なエネルギー回収を行なうことで、RF カップラーの負荷を 10kW 以下まで低減できることがわかった。本稿では、ERL 放射光源のための full-DC 入射器の構成と設計例を示し、エミッタンスやカップラーパワーの評価結果について述べる。

2. ERL 放射光源用 full-DC 入射器の構成

2.1 フォトカソード

ERL 用のフォトカソードとしては、NEA (negative electron affinity) カソード (GaAs など) と PEA (positive electron affinity) カソード (Cs_2Te 、 K_2CsSb など) が候補に上がっている。NEA カソードは、TJNAF の CEBAF、IR-demo で実績がある (ただし CW 5mA まで)。比較的長い波長のレーザー (~ 780 nm、Ti:Sapphire の基本波) で動作可能なためレーザー装置の開発は容易であるが、カソード表面が劣化しやすく高真空が要求されるので DC gun でのみ利用可能である。PEA カソードは TTF などで開発が進められており、10mA \times 数% duty のレベルでの実績を積みつつある。短い波長の光 (Nd:YLF の 2 次または 4 次高調波) が必要なため CW (100mA) 化には困難が予想される。

2.2 バンチ圧縮

主加速器に入射する時点である程度短いバンチ (~ 3 ps) にしておかなければ、周回軌道 (放射光生成を行なう) で 1ps 以下に圧縮するのが困難になる。ところが、NEA カソードを使った DC gun では数 ps のバンチを直接生成することはできない。NEA カソードは、光の吸収が小さく、表面から深い位置まで光が到達するからである。

ここでは、Cornell/Phase-I [4] のパラメータと同様にカソード直後のバンチ長を 17ps(rms) とし、主加速器入口までに 17ps \rightarrow 3.3ps の圧縮を行なうことにする。バンチ圧縮の方法としては、(1) 電子銃直後に buncher を置く (TJNAF/IR-demo)、(2) booster 空洞で圧縮 (Cornell/Phase-I)、(3) 合流部で磁気圧縮などが考えられるが、われわれは、所定のバンチ圧縮が得られ、かつ、当初の動機であるカップラーパワーの低減を達成できる方式として、合流後に velocity bunching を行なうことにした。velocity bunching には、位相速度を調整した RF 空洞で圧縮する方式 (ponderomotive bunching) とドリフト空間で圧縮する方式 (ballistic bunching) があるが、本稿では、両者を併用して所定の圧縮率とカップラーパワーの低減を同時に得るような設計を行なった。ちなみに、ponderomotive bunching と ballistic bunching の併用は、原研 FEL の 2.3MeV 入射器でも実績がある [5]。

2.3 合流部

入射器と周回軌道の合流部は、エミッタンス増大が比較的小さく、運転が容易な 3-dipole 方式を採用した。中央の偏向磁石のエッジ角でアクロマティックを実現し、さらに、エッジに曲率を設けることで 2 次収差を最小にできる。

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

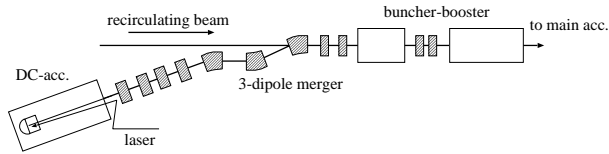


図 1: full-DC 入射器の構成: 2MeV で合流後、buncher-booster で圧縮を行ないつつ 24MeV まで加速し、主加速器へ入射する。

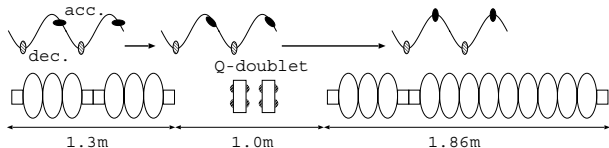


図 2: buncher-booster の構成: 3cell × 2 + drift(1m) + 3cell + 9cell。エネルギー回収を行ないつつ、17ps のパンチを 3.3ps まで圧縮する。

3. 設計例と性能評価

full-DC 入射器の例として以下のパラメータ (TESLA 空洞をベースに 1.3GHz のシステムに合わせてある) を使って設計を行なった。

電子銃: GaAs カソード、パンチ長 17ps(rms)、電荷 77pC、繰り返し 1.3GHz、平均電流 100mA、アノード電圧 250kV。DC 加速器: 加速電界 2MV/m、電圧 2MV。合流部: 3-dipole 型、偏向角 15 度、曲率半径 1m、磁石間 0.82m。buncher-booster: 1.3GHz、3cell × 3 + 9cell、空洞あたり加速電圧 1.2MV (3cell)、20MV(9cell)、 $Q_0 = 5 \times 10^9$ 。

3cell 空洞は TESLA 空洞 (9cell) と同じ形状とし、RF 空洞と DC 加速部の電界分布は、それぞれ SUPERFISH、POISSON で求め、PARMELA と組み合わせてビームダイナミクスの解析を行なった。アノード位置と DC 加速直後の 2 箇所にソレノイドを設置し、また、合流部の前後に計 6 台、buncher-booster の途中に 2 台の Q を置いて、横方向のマッチングを取った。Q のパラメータは TRANSPORT で決定した後に、空間電荷の効果による補正を施して PARMELA の入力とした。

図 3 にビームダイナミクスの計算結果として、電子銃から buncher-booster 出口までのビームエンベロープ (rms)、エミッタンス (規格化 rms)、パンチ長 (rms)、エネルギーをプロットした。buncher-booster 出口でのパラメータは、 $E=23\text{MeV}$ 、 $\epsilon_x = 1.5\text{mm-mrad}$ 、 $\epsilon_y = 1.5\text{mm-mrad}$ 、 $\sigma_z = 3.3\text{ps(rms)}$ などである。以下に、横方向・縦方向ビームダイナミクスについて詳しく述べる。

3.1 横方向エミッタンス

横方向エミッタンスのソースは、(1) カソードの熱エミッタンス、(2) カソード/アノード間におけるエミッタンス増大、(3) DC 加速中におけるエミッタンス増大、

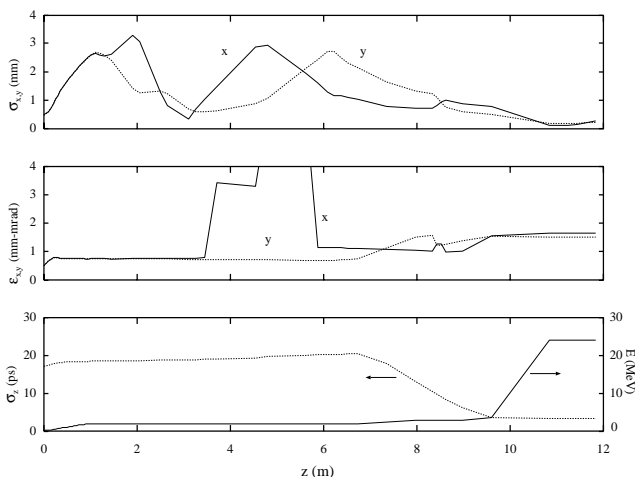


図 3: PARMELA によるシミュレーション結果: (上) エンベロープ、(中) エミッタンス、(下) パンチ長とエネルギー。

(4) 合流部におけるエミッタンス増大、(5) buncher booster におけるエミッタンス増大、などである。

NEA カソードの熱エミッタンスは、レーザースポット $r = 1\text{mm}$ に対して $\epsilon_{n,rms} = 0.13\text{mm-mrad}$ (以下、横方向エミッタンスは規格化 rms 値) である [3]。ここでは、カソード/アノード間におけるエミッタンス増大を含めてアノード直後で 0.5mm-mrad のエミッタンスを仮定し、PARMELA シミュレーションの初期値とした (アノード電圧は 250kV)。

DC 加速中のエミッタンス増大は、linear growth と nonlinear growth に分けられる。ソレノイド磁場を与えることで linear growth は補償可能である。アノード電圧 250kV、パンチ長 17ps(rms、parabolic 分布)、レーザースポット $r = 1\text{mm}$ 、加速勾配 2MV/m などとすると、2MeV までの DC 加速における linear growth は、 0.5mm-mrad と見積もられる。PARMELA の計算では、ソレノイドによる補償と nonlinear growth を含めて $\sqrt{0.7^2 - 0.5^2} = 0.5\text{mm-mrad}$ となった。

合流部におけるエミッタンス増大は x 方向 (偏向面) が主であり、偏向磁石の磁場分布に起因する高次収差と $\eta_x \neq 0$ 部におけるエネルギー再配分 (縦方向空間電荷、CSR) に起因する効果である。設計では、2 番目の偏向磁石のエッジ曲率を二次収差が最小になるように決めた。

空間電荷によるエネルギー再配分の効果は、電子エネルギー、パンチの形状 (縦横)、電荷量、偏向角、偏向磁石間の距離などの関数である [6]。PARMELA の計算結果が示すエミッタンス増大 $\sqrt{1.0^2 - 0.7^2} = 0.7\text{mm-mrad}$ は理論解析の結果とほぼ一致している。PARMELA に含まれていない CSR の効果をエネルギー再配分の大きさから見積もれば、空間電荷の寄与と同程度と考えられる。

buncher-booster でのエミッタンス増大は、RF 電場の非線形性と bunching に伴う空間電荷によるものである。両者ともに、横方向のビームサイズと関係があるので、ビームエンベロープを適切に制御することが重要である。ところで、ERL 入射器では合流部に偏向磁石があるために、x、y のエンベロープが非対称にならざるを

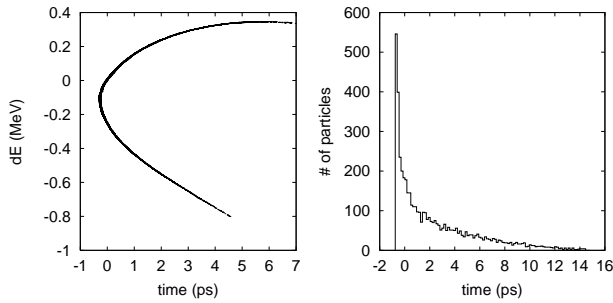


図 4: PARMELA によるシミュレーション結果: buncher-booster 出口での縦方向位相分布とバンチ波形。

得ず、図 3 にも示したように、ballistic bunching の過程 (drift) においてエンベロープの非対称性に対応したエミッタンス増大が現われる。PARMELA シミュレーションで得られた buncher-booster 全体でのエミッタンス増大は、x 方向が $\sqrt{1.5^2 - 1.0^2} = 1.1\text{mm-mrad}$ 、y 方向が $\sqrt{1.5^2 - 0.65^2} = 1.4\text{mm-mrad}$ となった。

3.2 縦方向ビームダイナミクスと RF 収支

PARMELA で得られた、buncher-booster 出口の縦方向位相分布とバンチ波形を図 4 に示す。rms 値で評価したバンチ幅は 3.3ps であるが、長い裾を引いたバンチ波形である。これは、バンチ圧縮の非線形性 (高次収差) のために、三日月型の位相分布になっているからである。高周波成分を多く含んだバンチ波形は、超伝導空洞中に高いパワーレベルの HOM を誘起するために、ERL 入射器としては好ましくない。より flat-top に近いバンチ波形を得るためには、XFEL のバンチ圧縮器と同様に 3rd-harmonics cavity を buncher-booster に組み込む必要がある。今後の検討課題としたい。

各空洞における RF 収支は、加速・減速ビームの電流と位相、空洞の Q_L と detuning (δf) から求めることができる。図 2 に示すように、3-cell 空洞では加速・減速ビームの位相差が 180 度にはならない。しかしながら、二つのビームの複素平面でのベクトル和は減速になるので、 Q_L と δf をうまく選べば、完全なエネルギー回収動作が可能で RF の供給をほぼゼロにできる。ただし、ビーム off ($\delta f = 0$ でマッチングがとれる) からビーム on への過渡変化に応じて、tuner を大きく (kHz オーダーで) 動かさなければならない。ここでは、tuner を固定した状態で、beam-on/off とともにカップラーパワーが小さくなるような Q_L と δf を求めた (表 1 参照)。RF 収支がもっともバランスしにくい #1 空洞でも、カップラーパワーを 10kW 以下とできることがわかった。もちろん、fast tuner による過渡制御を行えばカップラーパワーはさらに小さくできる。

9cell 空洞は、エネルギー回収が完全に行なえるので、カップラーパワーは microphonics などの外乱に対する RF 制御の裕度で決まる。Cornell/Phase-I では 8kW としているが、われわれの設計でも同じレベルにできる。

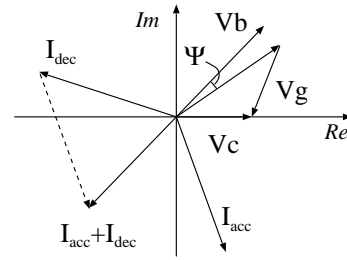


図 5: 3cell 空洞における RF 収支: 加速電流 (I_{acc}) と減速電流 (I_{dec}) の和が作る電場 (V_b) と空洞電界 (V_c)、RF generator (V_g) が釣り合う。角度 Ψ は detuning angle である。

表 1: 3cell 空洞のパラメータ

	Ψ_{acc} / Ψ_{dec}	Q_L	$\delta f(\text{Hz})$	$P_g(\text{kW})$
#1	-70 / 162	4.8×10^4	2700	9.9
#2	-67 / 150	6.5×10^4	1700	6.2
#3	77 / 241	1.3×10^5	400	1.8

4. まとめ

Dynamitron 型の DC 加速器を使った ERL 放射光源の入射器を提案し、設計例を示した。NEA カソードを用いた電子銃、3-dipole 型合流部、buncher-booster(1.3GHz) を組み合わせた構成で、ERL 放射光源が要求する電子ビーム: 平均電流 100mA(77pC \times 1.3GHz)、規格化エミッタンス (<2mm-mrad)、バンチ長 (rms 3ps) が得られ、また、buncher-booster では部分的なエネルギー回収を行なうことで、カップラーパワーを 10kW 以下に抑えられる見通しを得た。

本稿の解析に含めなかった CSR を含んだビームダイナミクス、3rd-harmonics cavity によるバンチ圧縮の改善、fast tuner による RF detuning の制御、DC 加速電圧のリップルの影響などは、今後の検討課題としておきたい。

参考文献

- [1] D. Bilderback et al., Synchrotron Radiation News, vol. 14, No. 3, 12–21 (2001); M. Tigner et al., Proc. 2001 Particle Acc. Conf. pp. 230–232.
- [2] C.C.Thompson and M.R.Cleland, Nucl. Instr. Meth. B40/41 (1981) 1137–1141.
- [3] C.Sinclair, “photocathode and DC gun summary”, in Proc. of the PERL Photocathode Gun Workshop, <<http://nslsweb.nsls.bnl.gov/nsls/org/PERL/GunWorkshop.htm>>
- [4] S.M.Gruner and M.Tigner, eds., “Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac Synchrotron Light Source at Cornell University, CHSS Technical Memo 02-003, JLAB-ACT-01-04 (2001).
- [5] 羽島良一 他, “原研 FEL におけるエネルギー回収の実証と 10kW upgrade 計画”, 本論文集.
- [6] B.E.Carlsten et al., IEEE QE-27 (1991) 2580–2597; R.Hajima et al., Proc. EPAC-2000, pp.1033-1035.