

PRESENT STATUS OF OPTICS DESIGNS FOR

3-GEV ERL AND COMPACT ERL

Miho Shimada^{#,A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)},
Kentaro Harada^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK
Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Agency, JAEA
Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

The 3-GeV ERL project proposes the XFEL as well as an undulator based light source. It requires a high quality electron beam, so the electron beam after circulation and double acceleration are simulated including effects of the radiation excitation and the CSR wake. In addition, the start-to-end simulation is performed for the compact ERL to estimate the effects of the space charge and CSR wake.

3 GeV ERL およびコンパクト ERL のオプティクス設計の進捗状況

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、高エネルギー物理だけでなく、X 線放射光源としても最先端を目指すため、3 GeV クラスのエネルギー回収型線形加速器 (ERL) を提案している^[1]。多数周回による電子ビームの質の劣化がないという特徴を生かして、フェムト秒放射光源のための短バンチ運転、共振器型 X 線自由レーザー (XFEL) ^[2]、エコー法高調波生成 (EEGH) ^[3] などの応用が期待されている。

その実証器として、サブ GeV クラスのコンパクト ERL (cERL) の建設が始まっており、今年度末のファースト・ビームを目指している。当初は 35MeV で周回・エネルギー回収を実証し、最終的には 200MeV までアップグレードをする予定である。本発表では、将来計画の 3-GeV ERL およびコミッションを行う 35MeV cERL のラティスデザインおよびオプティクスについて報告する。

2. 3-GeV ERL のラティスおよびオプティクス

2.1 レイアウト

つくばキャンパスにおける 3-GeV ERL のレイアウトを図 1 に示す。周回部のエネルギーが 3GeV であるが、XFEL の運転に供給する 6GeV ビームの生成は、エネルギー回収を行わず主加速器で 2 回加速することで行う。主加速器の加速勾配は 15MV/m を達成多能であるが、フィールドエミッションなどの影響を考慮した結果、加速空洞の直線部のみで 470m となった。入射合流部からダンプ取り出しまでの長さはおおよそ 2000m である。

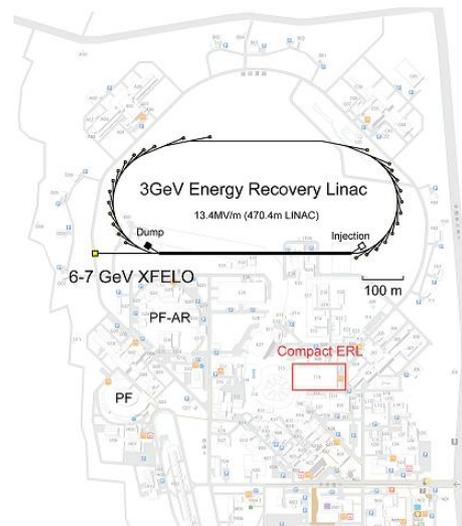


図 1 : KEK つくばキャンパスにおける 3-GeV ERL の配置および模式図。cERL は ERL 開発棟 (旧東カウンターホール) に位置する。

表 1 : 通常運転 (短パルス運転) のパラメータ

Electron energy	3 GeV
Merger/Dump energy	10 MeV
Normalized emittance	0.1 (>1) mm-mrad
Bunch length (rms)	1-3 (<0.1) ps
Energy spread	< 2e-4 (> 1e-3)
Electron charge	77 pC (1 nC)
Beam current	100 mA (< 1mA)

[#] miho.shimada@kek.jp

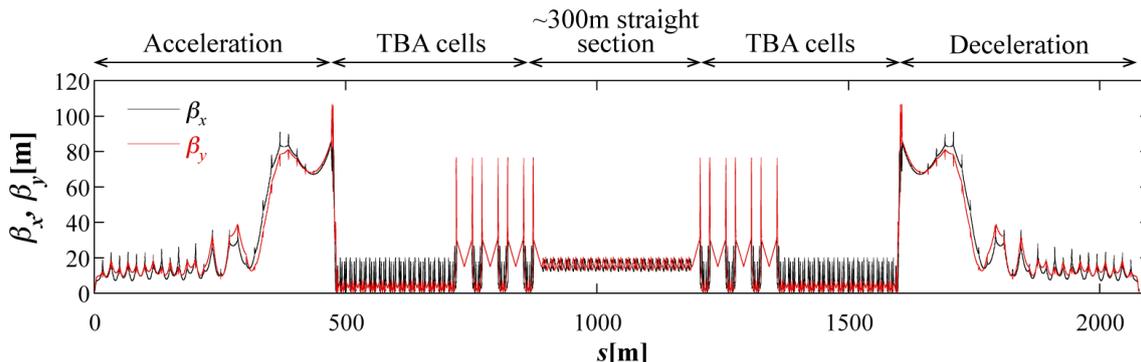


図 2： 3 GeV ERL の線形オプティクス。

周回部の直線部は 6m が 22 ヶ所、30m が 6 ヶ所ある。北側にはおよそ 300m の直線部があり、EEHG などに利用する計画がある。表 1 に最終的な目標である運転モードのパラメータを載せる。

2.2 線形オプティクスの設計

加速空洞の並ぶ直線部は加速する電子と減速する電子が通過するため、2 つの電子エネルギーに対してオプティクスを最適化する必要がある。空洞の高次高調波によるビームブレイクアップ (HOM BBU) を抑えることに重点を置き、全体的にベータ関数を抑えることを試みた。加速と減速のオプティクスを対称にするために、クライオスタットの間に配置されたトリプレットの電流値をライナックの中心を基準に対称になるようにパラメータを設定している。各トリプレットは同じ K 値の組み合わせで、低エネルギーの電子 (10MeV-1.5GeV) に対して最適化した後、高エネルギーの電子 (1.5GeV - 3GeV) のベータ関数が最小になるように、トリプレット毎に異なる組み合わせの K 値を探索した^[4]。

ライナックは 8 つの 4 極電磁石で構成されるマッチング部を経て、トリプル・ベンド・アクロマット (TBA) で構成される周回部へとつながれる。偏向電磁石の曲率半径および長さはそれぞれ 19.1m、1m であり、TBA の中央のみ長さが 2m である。バンチ長が変わらないようにアイソクロナスに設計しているが、短バンチモードでは R56 を non-zero にする予定である。6m および 30m 直線部中央のベータ関数は 3m および 15m である。EEHG が入る予定の 300m 直線部は、現在 FODO で構成されている。

ライナックと TBA は SAD^[5]を用い、そのほかのマッチングは elegant^[6]を用いて設計した。

2.3 トラッキングによる電子ビームの評価

通常の運転モードと XFEL モード^[7]についてトラッキングを elegant を用いて行った。これらの主な電子ビームのパラメータを表 2 に示す。CSR wake のシミュレーションでは、Transient の効果や出口の効果も含めているが、真空チャンバーによる遮蔽の

影響はないものと仮定している。加速空洞についてはエッジや収束の効果^[8]を含め、TESLA 空洞の縦方向の wake を使用した^[9]。

100k 個の粒子によるトラッキングの結果では、どのケースにおいても数%の増加にとどまった。これは放射励起によるものであり、CSR wake による emittance 増加は誤差以下であった。一方で、エネルギー分布は CSR wake の影響が顕著なケースがあった。図 3 に 2 つの XFEL に対する縦方向の位相分布を載せる。Case A では、RF curve によってほぼ決まるが、CSR wake によってわずかに潰されて、エネルギー広がりが小さくなった。Case B では、CSR wake によるエネルギー分布の変調がはっきりと現れた。

表 2：通常運転と XFEL 運転における電子ビームの主なパラメータ

	Normal	XFEL (Case A)	XFEL (Case B)
Normalized emittance	0.1 mm-mrad	0.1 mm-mrad	0.1 mm-mrad
Electron charge	77 pC	20 pC	7.7 pC
Bunch length	2 ps	1 ps	0.38 ps
Energy spread after full acceleration (rms)	2e-4	5e-5	1.5e-5

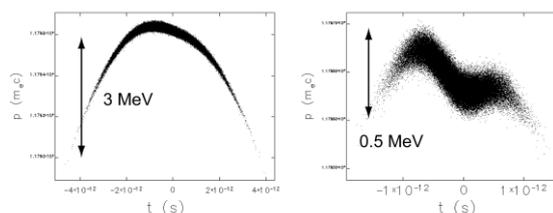


図 3： 6 GeV 加速後の縦方向の位相空間分布 (左): Case A, (右) Case B

3. コンパクト ERL のラティスおよびオプティクス

3.1 主なパラメータとレイアウト

cERL のレイアウトを図 4 に示す。最終目標は、加速勾配 15MV/m の 8 つの 9 セル加速空洞をインストールし、2 回加速で 245MeV を達成することである^[10]。コミショニングでは、2 つの空洞を設置し、1 ループ・35MeV でエネルギー回収を実証することを目指す。最初の運転では、電子ビームを合流させずに、直線上でビーム診断を行い、そのための診断ラインおよびダンプを設置している。入射合流部の角度は 16 度で入射ビームのエネルギーは 5MeV を想定している。合流部と主加速空洞の間のおよそ 7m のスペースは、次の空洞がインストールするまでは、ビーム診断ラインとして有効活用する予定である。ダンプラインへの取り出しも 16 度であり、エネルギーは 5MeV である。また、周長の日較差・年較差を補正するためのシケインを設置しており、±5mm の補正が可能である。

3.2 線形オプティクスの設計およびトラッキング

オプティクスの設計は理想的には一つのコードで行うべきだが、加速器の場所や電子エネルギーによって重要なビーム物理が異なる場合がある。このような場合、場所・電子エネルギーによって適切な計算コードを用い、それらの最適化した結果をつなげていく手法を start-to-end simulation (S2E simulation) と呼ぶ^[11]。cERL では 2 つのコードを用いて、線形オプティクスの最適化を行った。ひとつは GPT^[12]で、電子銃から主加速空洞で 35MeV に加速するまでの空間電荷効果を含めるために用いた。35MeV に加速した後からダンプまでは、計算時間

を短縮できる elegant を用いた。これは空間電荷効果を含めた計算は不可能だが、1 次元の CSR wake の影響を評価することが可能である。

2 つの計算コードが切り替わる点(点 A)を図 4 に示す。点 A の適切な twiss parameter の範囲に入るように GPT で最適化を行い、その結果をもとに周回部のオプティクスの設計を行った。電荷量はコミショニング運転で想定される 7.7pC とし、合流部のエネルギーがおおよそ 5MeV とした。点 A におけるエミッタンスは(enx, eny)=(0.3,0.4)[mm-mrad]を達成し、そのときのパンチ長およびエネルギー広がりはおおよそ 3ps および 3e-4 である。周回部の線形オプティクスの結果を図 4 の(b)に示す。CSR wake の影響を小さくするため、アーク部のベータ関数を小さくし、全体のベータ関数を 30m 程度以下に抑えた。

一般的に、空間電荷効果が無視できるとされる電子エネルギーは 200MeV 以上であるため、35MeV の周回ビームでは無視できない可能性がある。その影響を調べるために、第 2 アーク出口までの GPT でトラッキングを行った。この計算では、電子の位相空間分布は電子銃からトラッキングした結果を引き継ぎ、計算時間の節約のため CSR wake の効果は無視した。横方向の rms サイズの結果を図 5 に示す。水平(x)・垂直(y)ともに影響は小さく、最大でも数割程度の増加程度であることがわかった。CSR wake の影響は elegant のトラッキングで別に行った。そのときのエネルギー広がりおよびエミッタンスの変化を図 5 に示す。エネルギー広がりはずかであるが徐々に増加するのに対し、エミッタンスは小さくなってきている。これは、水平方向のガウシアン分布ではない位相空間分布が、偶然に補正されたことが原因と思われる。しかし、7.7pC では CSR wake の影響は小さいことがわかった。

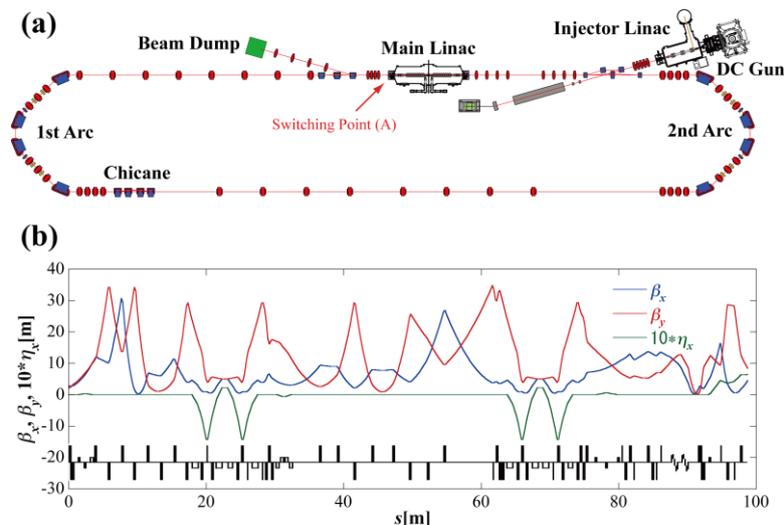


図 4：コンパクト ERL のラティスおよび線形オプティクス。最初のコミショニング運転である 35MeV のシングルループについて示している。

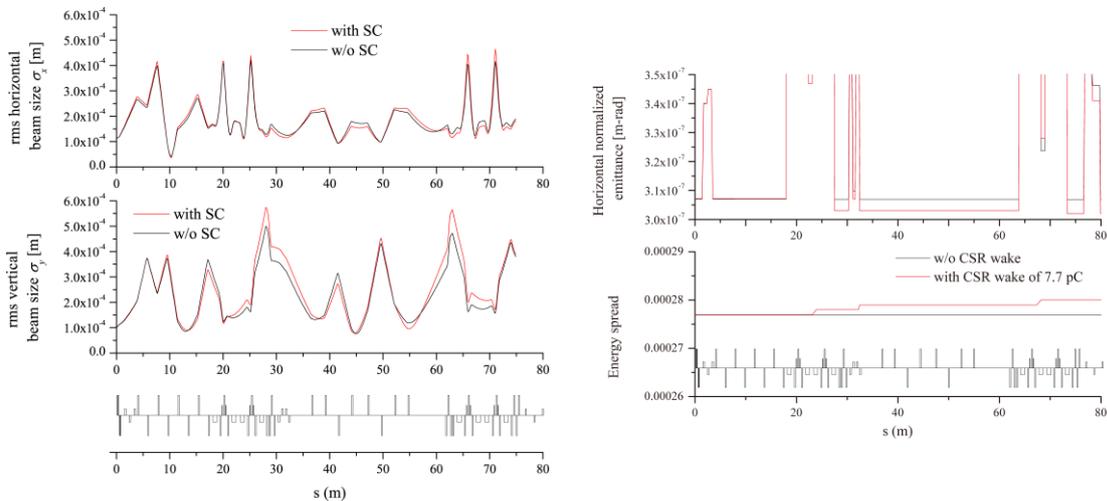


図 5 : コンパクト ERL における空間電荷効果および CSR wake の影響。35MeV 加速直後から、リターンアーク出口まで。電荷量は 7.7pC、バンチ長はおよそ 3ps である。
 (左) : 空間電荷効果 (SC) による rms ビームサイズの違い、(右) : CSR wake によるエミッタンスの違い。

4. まとめ

将来計画の 3-GeV ERL およびその実証器である cERL について、ラティスおよび光学系の設計状況をまとめた。

3-GeV ERL では、HOM BBU を抑えるために加速空洞全般で β 関数を小さく抑え、周回部はアイソクロナスの TBA で構成し、十分な数の直線部を確保した。周回部における放射励起や CSR wake の影響をトラッキングで調べたところ、エミッタンス増加は数%程度と小さいことがわかった。XFEL のパラメータによっては CSR wake によるエネルギー分布の変調が顕著であったが、発振には問題無いことが確認された。

cERL は S2E simulation を用いて線形光学系の設計を行った。コミッションの 7.7 pC、3ps の場合で 周回部における空間電荷効果および CSR wake の影響を調べたところ、大きな影響がないことがわかった。

参考文献

[1] Energy Recovery Linac Preliminary Design Report, IMSS/KEK (2012).
 [2] K. -J. Kim *et al*, Phys. Rev. Lett. 100, (2008) 244802.
 [3] G. Stupakov, Phys. Rev. Lett. 102, (2009) 074801.
 [4] e.g. I. V. Bazarov, Proceedings of PAC'01, Chicago, p.3347-9, (2001)
 [5] SAD, <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
 [6] M. Borland, 'elegant :A flexible SDDS compliant code for accelerator simulation', LS-287 (Advanced Photon Source, Argonne, 2000)
 [7] R. Hajima *et al.*, in these proceedings.
 [8] J. Rosenzweig and L. Serafini, Phys. Rev. E 49, (1994) 1599-602
 [9] TESLA Technical Design Report (2001).

[10] M. Shimada *et al.*, Proceedings of IPAC'11, p.1909-11, (2011)
 [11] e.g. S. Reiche *et al*, Proceedings of PAC'01, Chicago, p.2751-53, (2001), C. Gerth *et al*, Proceedings of PAC'05, Tennessee, p.1643-45, (2005)
 [12] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>