

# LATTICE DESIGN OF TWO-LOOP COMPACT ERL

Miho Shimada<sup>#,A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 OHO, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency, JAEA

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

## Abstract

Two loop scheme is a strong candidate for the 5-GeV Energy Recovery Linac (5-GeV ERL) for saving the costs of superconducting accelerators, cryogenic facilities and a building site, and so on. The lattice design of the Compact ERL (cERL) is in progress as a test facility of the two loop ERL for studying the beam dynamics and developing the operation skill and beam monitoring system. This paper is the first report of the linear optics after refinement of the lattice design.

## 2 ループ Compact ERL のラティス設計

### 1. はじめに

KEK 敷地内に建設予定の 5 GeV エネルギー回収型線形加速器(ERL)は、超伝導加速空洞や冷凍機設備のコスト、敷地面積の制限から、2 回の加速で 5 GeV を達成する 2 ループ案が有力候補として挙げられている[1]。しかし、2 ループ ERL では、高次モードによるビーム・ブレイク・アップ(BBU)や CSR wake などの影響が大きくなるなど、低エミッタンスビームの実現が困難になることが懸念されている。さらに、ビーム診断やオペレーションも複雑になる。

その 2 ループによる様々な問題点を解決するための試験機としてのコンパクト ERL (cERL)の計画が進められている。現在、建設が本格的に開始され、ラティスデザインが急がれている。すでに、ブドガー原子核物理学研究所では、繰り返し 180 MHz の常伝導加速空洞で多重ループ ERL の運転に成功しているが[2]、1.3 GHz の超伝導加速空洞による試みは初めてであり、各研究施設の注目を集めている。

2 ループ cERL のラティスはオプティクスの計算結果を元に改良を重ねている。本稿では、設計方針について説明をした後、改良したラティスデザインの線形オプティクスについて報告する。

### 2. ラティスデザインの改良

2 ループ cERL のラティスを図 1 に示す。500 kV の高輝度 DC 電子銃で生成された電子ビームは、入射器用超伝導加速空洞で 5 MeV まで加速された後、

周回部に合流する。周回部の主加速器で加速勾配 15 MV/m が達成されると想定すると、1 回の加速で 120 MeV のエネルギーが電子ビームに与えられる。

この 125 MeV の電子ビームは内側ループを周回し、再び主加速器で加速され、最大 245 MeV に到達する。外側ループを周回した後に、主加速空洞の減速位相に乗った電子ビームはエネルギーを回収され、再び内側ループを通過した後に 2 回目のエネルギー回収が行われる。最終的に 5 MeV になった後に 500 MW ビームダンプに誘導される。

主加速空洞は段階的に拡張する予定であり、初期の段階では 2 セルのクライオモジュールが 1 台のみで、1 回の加速で電子に与えるエネルギーは 30 MeV である。一方で、入射エネルギーは初期の段階から 5 MeV を想定している。これは、低い入射エネルギーでエミッタンスが増加してしまうことを避けるためであるが、内側と外側ループのエネルギーが最終的な段階と異なり、中心軌道のずれが発生する。

当初はこの中心軌道のずれを 3 つの偏向電磁石からなる分岐シケインで自動的に軌道が補正される仕組みになっていた。しかし、設置面積が大きいこと、4 極電磁石のない分岐シケインで過収束が起り、過度にビームサイズが小さくなってエミッタンスが増加する恐れがあることから、一つの分岐用偏向電磁石に 2 つのステアリング電磁石を組み合わせ、適宜軌道を補正する方法を採用した。この改良によって、主加速空洞の前後に位置補正機構を設置するためのスペースを追加することが可能になった。

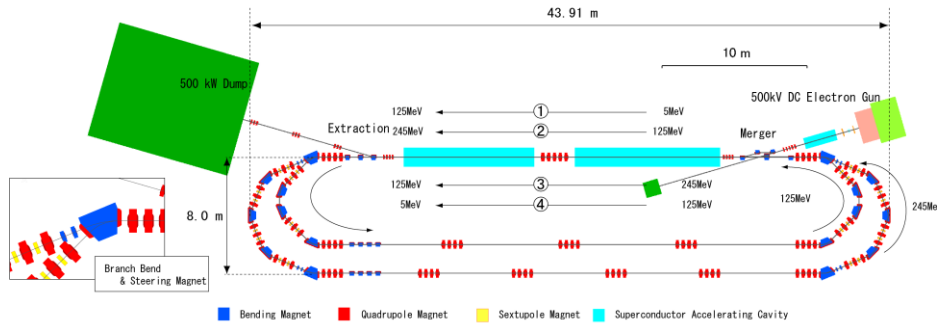


図 1 : 2 ループ cERL のラティスデザイン。

### 3. 線形オプティクス設計方針

2 ループ ERL のオプティクスの特徴は以下の 3 点である。

1. 主加速空洞の直線部に 4 つのエネルギーの電子ビームが通過する。
2. 内側ループは 2 回通過する。
3. ダンプ直前の 5MeV 電子ビームではエミッタンスが増加している可能性があるため、ベータ関数が小さいほうが望ましい。

このようなラティスで入射直後から順を追ってオプティクスを設計すると、徐々に調整可能な 4 極電磁石がなくなり、 $\beta$  関数を適切な大きさに抑えることができなくなってしまう。そこで、主加速空洞のある加速直線部と 2 つのループを切り離して設計する方針を提案した。図 2 にその模式図を示す。入射合流部からダンプへの取り出しシケインまでの直線部全体で、適切な  $\beta$  関数になっているかと確認しながら 4 極電磁石の調整を行う。ここで、内側・外側ループの  $\beta$  関数は左右対称に設計するものとし、仮のオプティクスで繋げる。

さらに  $\beta$  関数の最適化を簡略化するため、加速直線部および 2 つのループの 4 極電磁石の配置および  $K$  値がほぼ左右対称になるようにした (図 3)。すると、加速と減速のオプティクスがほぼ対称的な形状になるため、加速の場合のみ最適化すればよい。基本的に最もエネルギーの低い電子ビームに最適化する方針である。しかし、図 3 の QS2 や M1, M2 を通過する 2 つの電子ビームはエネルギー比が小さいため、高エネルギービームのオプティクスにも注意を払う。

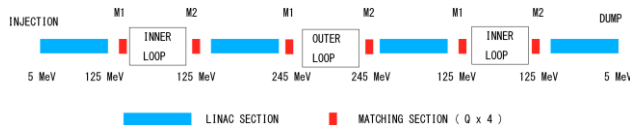


図 2 : 2 ループのラティスを直線上に配置した図

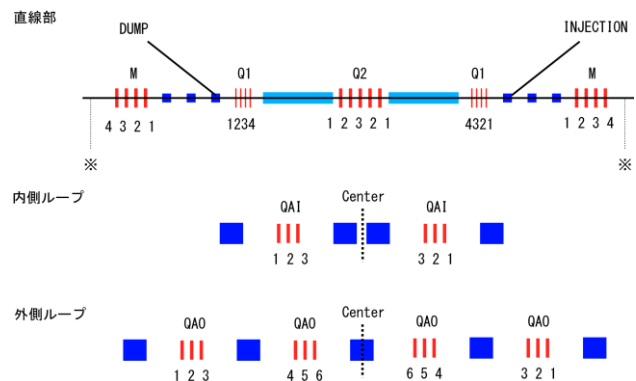


図 3 : 左右対称のオプティクス設計

内側のループのアイソクロナス・アクロマットは偏向電磁石間のトリプレット (QAI) で行い、加速直線部とは独立して最適化をする。トリプレットの極性は  $K$  値が小さい DFD を採用した。その後、マッチングのための 4 極電磁石 (M) を用いて、加速直線部と繋げる。外側ループはすでにマッチングセクションの  $K$  値が独立に調整できないため、加速直線部および内側ループのオプティクスが決定した後に繋げていく。

また、入射合流部の Twiss parameter に対する柔軟性も必要とされる。電子銃直後から入射合流部までは、電子のエネルギーが低いため、空間電荷効果などによる非線形効果によるエミッタンス増加が大きい。そのため、入射する電子のエネルギーなどの条件によって、最適なオプティクスが大きく異なることが予想され、そのような各々の条件に対してオプティクスを見つける必要があるためである。

### 4. 2 ループ cERL の線形オプティクス

計算コードは elegant を使用した。このコードでは J. Rosenzweig の定在波型空洞のモデルを容易に取り込むことができ[3]、また CSR wake などを入れた粒子トラッキングが可能であるためである。線形オプティクスを設計する際に、主加速空洞の位相を on crest に固定し、また 4 極電磁石の  $K$  値を 2 以下に制限した。 ( $K$  値の定義は  $K1 = (e \partial B / \partial x L) / P$ )

とする。ここで、 $B$ 、 $L$ 、 $e$  および  $P$  は磁束密度、磁極長、電子の電荷量および運動量である。)

3 章で示した方針に従って計算したオプティクスを図 4 に示す。3 つのベンドからなる入射合流部直後では、Twiss parameter の最適解は  $xy$  面上に対して楕円のプロファイルを持つ。ここでは、 $(\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y) = (13 \text{ m}, -2, 0.7 \text{ m}, 0)$  とした場合の結果を載せた。 $\beta$  関数の最大値は加速空洞と反対側の直線部で  $\beta_x$  が  $57 \text{ m}$  であった。4 極電磁石の  $K$  値は最大となったのは外側のアーク部でおよそ 2 に近い値になった。これは、内側ループに比べて大きい、パラメータが多く、最適な極性が見つかっていないことも原因と考えられる。

次に、入射合流部の Twiss parameter の変化に対する柔軟性を確認するため、cERL 入射器で最適化した暫定の Twiss parameter の組み合わせで 2 ループのオプティクスを同じ手法で計算した。その結果を図 5 に示す。図 4 のケースに比べて、 $\beta$  関数が入射合流部出口で大きいため、周回部全体的に渡って  $\beta$  関

数が大きくなってしまった。また、合流部直後の 4 極電磁石で 2.5 近くの  $K$  値が必要であることが分かった。

## 5. まとめ

改良したラティスにおいても、これまでと同じ手法で線形オプティクスが求めることが可能であることが確認された。また、幅広い入射合流部の Twiss parameter に対して周回部のオプティクスに解があることが確認できた。

## 参考文献

- [1] S. Sakanaka et al., in these proceedings, FSRP09.
- [2] N. A. Vinokurov et al., IPAC'10, pp. 2427-2429.
- [3] J. Rosenzweig and L. Serafini, Phys. Rev. E, **49**, (1994) 1599-1602

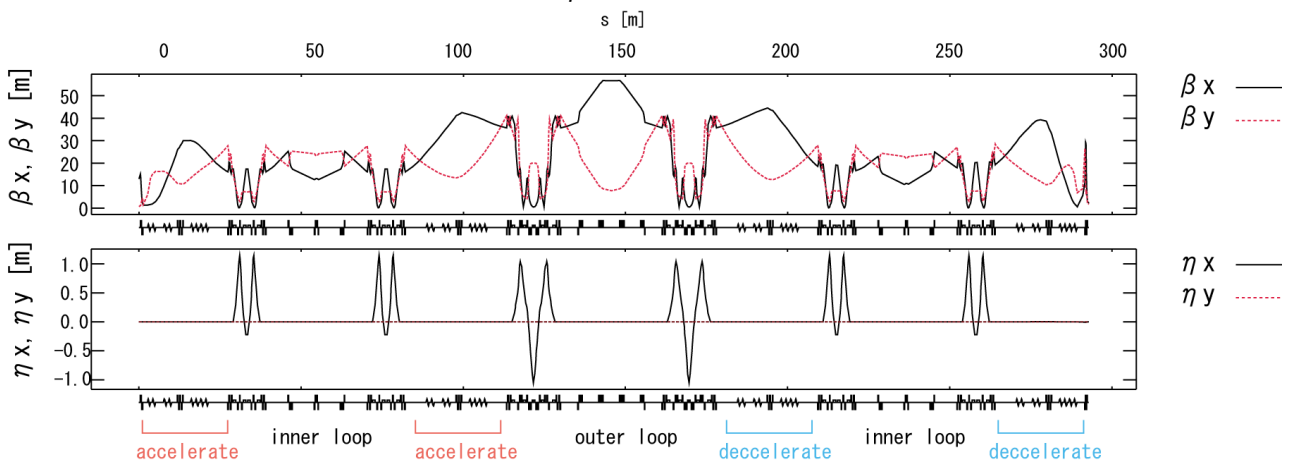


図 4: 入射合流部出口で  $(\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y) = (13 \text{ m}, -2, 0.7 \text{ m}, 0)$  としたときの周回部の線形オプティクス

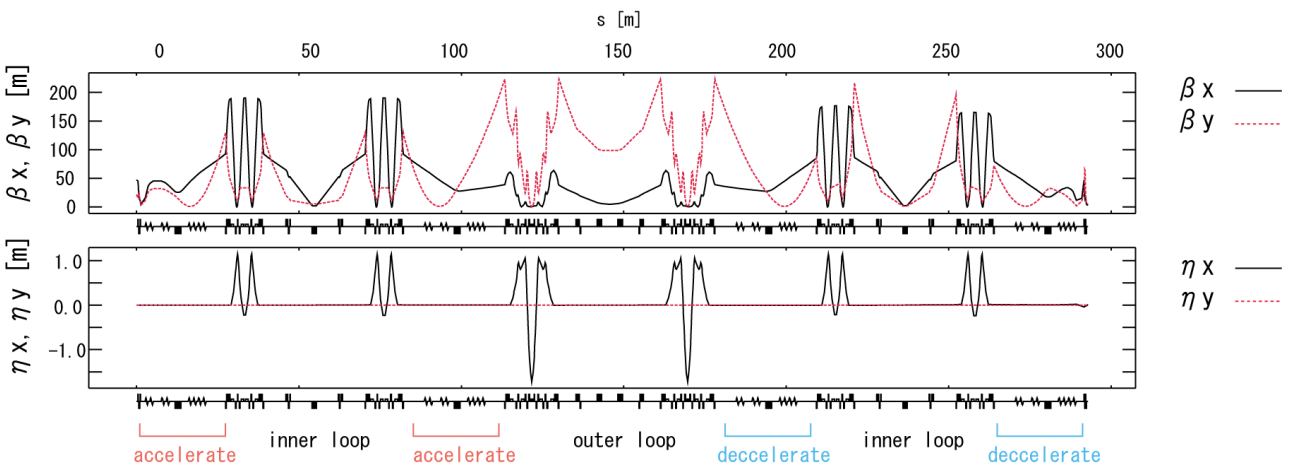


図 5: 入射合流部出口で  $(\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y) = (47.1 \text{ m}, 1.65, 21.5 \text{ m}, 5.52)$  としたときの周回部の線形オプティクス