

LATTICE DESIGN OF THE COMPACT ERL FOR FIRST COMMISSIONING

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

^{A)} KEK-PF, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{B)} JAEA, 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

^{C)} ISSP-SRL, University of Tokyo, Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa, Chiba 277-8581

Abstract

cERL (Compact Energy Recovery LINAC) is now constructing in East Counter Hall at KEK Tsukuba campus. The beam energy of cERL will be finally 245MeV with double loop recirculation path. For the first stage of construction, however, the beam energy is 35MeV with single recirculation path. The RF module for main LINAC is only one. In this paper, we show the lattice and optics design for the first step construction of cERL.

cERL 運転開始に向けてのラティス設計

1. はじめに

2012 年度のビーム運転開始に向けて、KEK 東カウンターホールに cERL (Compact Energy Recovery Linac) の建設が進められている^{[1],[2],[3],[4]}。最終的には 2 ループの周回部を建設し、ビームは 245MeV まで加速、最大平均電流値 100mA での運転に挑戦する計画であるが、最初の段階では、電子銃と主加速空洞の試験を主な目的として、よりコンパクトな 1 ループの周回部を建設し、ビームエネルギー 35MeV、最大平均電流値 10mA、規格化エミッタンス 1mm-mrad 以下での運転が目標とされている。この発表では、最初の段階の建設に向けての、1 ループ、低エネルギー運転用のラティスおよびオプティクス設計について述べる。

2. ラティス設計の方針

1 ループの周回部の設計は、2 ループの設計に応

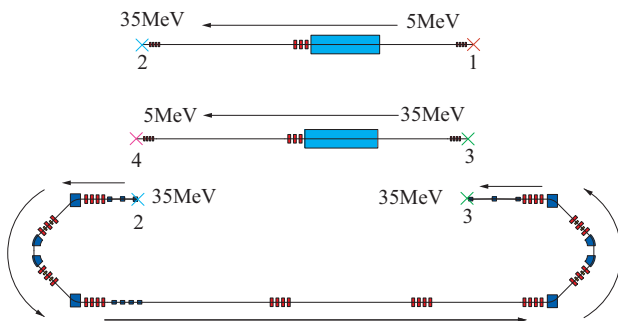


図 1：周回部の段階的設計



図 2：空洞直線部の設計

用できる様に、部分毎に段階的に行うことにする。1 ループの場合の周回部の設計方針を図 1 に示す。周回部分と主 LINAC 空洞の直線部は別々に設計する。光学関数を繋ぐ点は、ビームラインの入口と出口を合わせて 4 点あり、それぞれ自由に光学関数を決めることができる。今回の場合、簡単の為に 4 点で全て同じ値とし、

$(\alpha_x, \beta_x, \eta_x, \eta'_x, \alpha_y, \beta_y) = (0, 15m, 0m, 0, 0, 12m)$ とした。各段階の設計について順を追って述べる。

3. LINAC 直線部の設計

設計の最初のステップとして、主 LINAC を含む直線部に対してマッチングを行う。ビームはこの直線部を 5MeV から 35MeV への加速時と、35MeV から 5MeV への減速時の 2 回通過する。4 極電磁石の磁場は同じであるが、ビームの感じる集束力はエネルギーに依存する為、加速と減速のビームラインを別々に考える。4 極電磁石の値は独立でない値とし、ビームラインとしては、図 2 の様に、中央に周回部の代わりに仮想的な繋ぎ部分を挟む。今回の場合、加速の出口と減速の入口の光学関数は繋ぎ無しでも繋がる値であるが、柔軟性を試す為にも繋ぎ部分を入れて設計を進めた。

ビームエネルギー 245MeV の為には主 LINAC として 9 セルの空洞が 8 本入る予定だが、最初の段階では空洞 2 本が入った 1 つの冷凍モジュールのみが設置される。設置場所は上流側に非対称の場所であり、それに伴い、マッチングも非対称であることが要求され、その為、4 極電磁石を追加して設置することが必要となる。空洞へ入射されるビームは、特に水平方向について分散関数のミスマッチやエネルギーのジッターによるビームロスの効果を小さくするため、集束傾向であることが望ましい。オプティクスの例を図 3 に示す。

[#] kentaro.harada@kek.jp

また、弧部のエネルギーによる軌道長の差である R_{56} を使ってバンチ圧縮を行う為には、空洞の位相をずらして加速し、ビームの縦方向にエネルギー勾配をつけることが必要である。RF 位相を変えてマッチングした場合の光学関数を図 4 に示す。

4. 弧部の設計

cERL の運転では、大電流モードや低エミッタンスモード、短バンチモードなど、いくつかの運転モードが想定されるが、特に短バンチモードの場合、

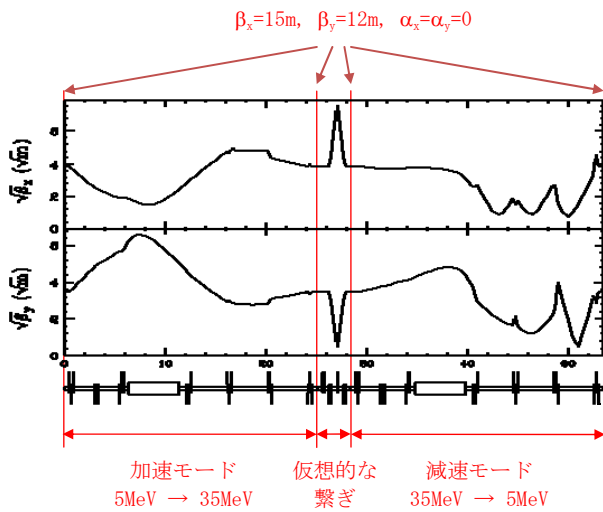


図 3 : 主 LINAC 直線部のオプティクス例

バンチ圧縮を行うためには、 R_{56} の柔軟性が重要となる。ここでは、弧部の中央の 4 極電磁石の極性が、

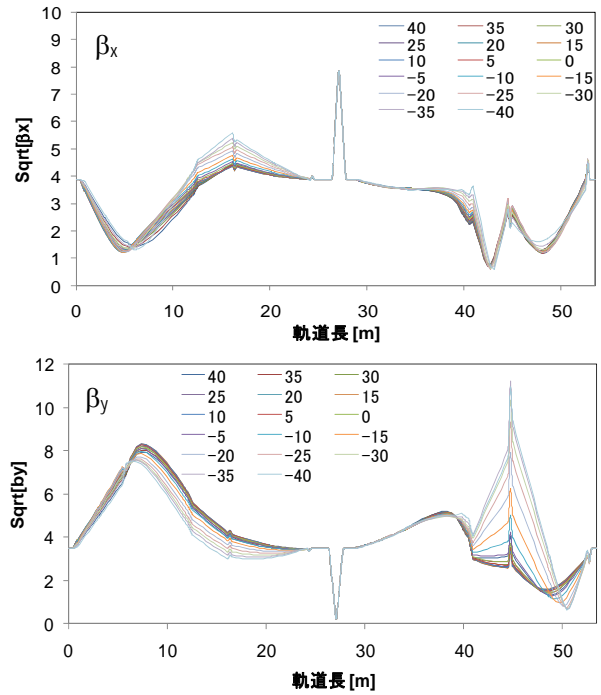


図 4 : off-crest 加速の場合の $\beta_{x,y}$ の変化。凡例の数字は RF の加速位相、on-crest から位相差である。実際の運転で想定されるように、加速電圧は一定であり、off-crest の場合はエネルギーが 35MeV よりも下がる。

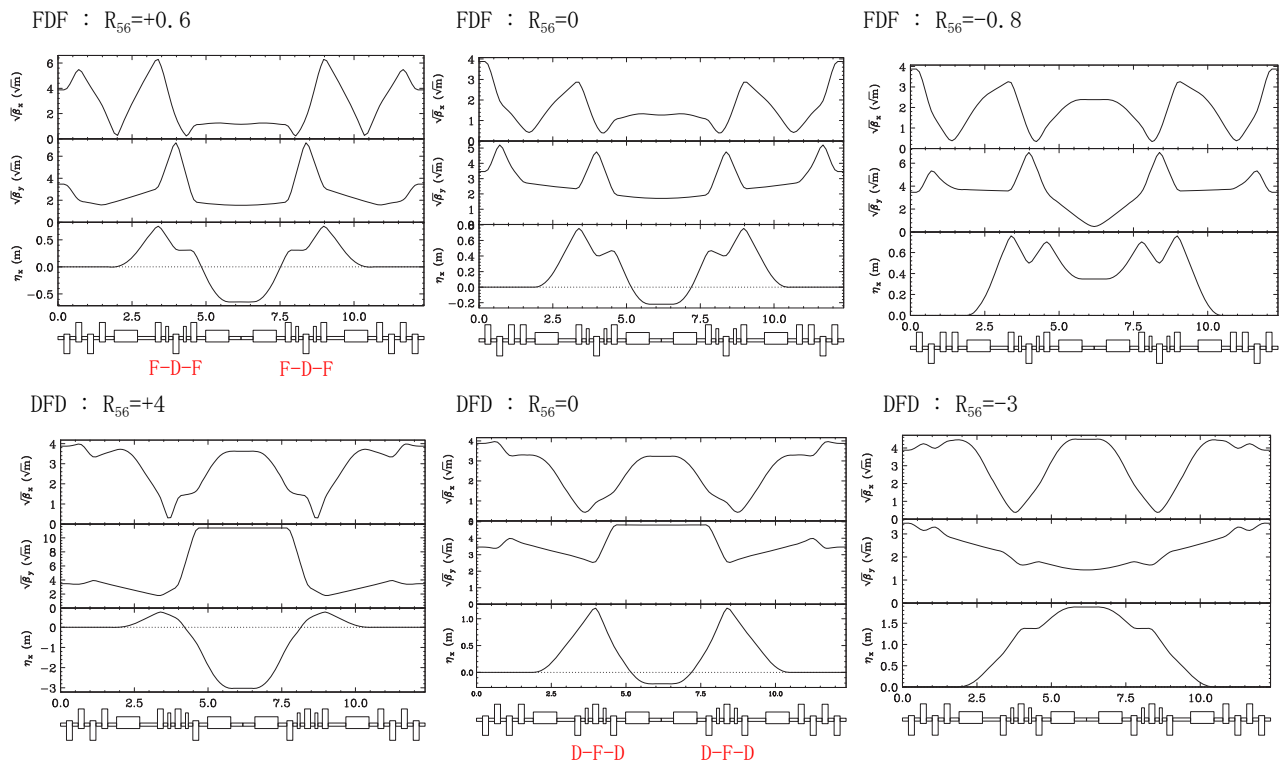


図 5 : 4 極電磁石の極性と、 R_{56} の柔軟性

水平方向に「D-F-D（発散-集束-発散）」と「F-D-F（集束-発散-集束）」という2通りについて計算を行った（図5）。一般に、 β_x と η_x は4極電磁石の集束力に対して同じ傾向を示し、 β_y は逆の傾向を示す。D-F-Dの場合、 R_{56} を変化させようとする、例えば β_x は下げられない限界に来ているが、さらに η_x を小さくしなければならない、という様なぶつかり合いが生じ、マッチングが困難となる。これは、旧案では1台だった弧部中央の偏向電磁石を2台に分割し、ドリフトスペースを挿入したことによるもので、旧案では見られなかった困難である。現在のラティスの場合、極性がD-F-Dの場合、 R_{56} の可変範囲は $+0.6m > R_{56} > -0.8m$ であり、4極電磁石の値は連続に変化せず、マッチングも容易ではなかった。一方、極性反転させてF-D-Fとして同様の計算を行った場合、劇的にマッチングが容易になり、また、 R_{56} の可変範囲も $+4m > R_{56} > -3m$ と約5倍に広がる。マッチングは初期値や光学関数の条件付けに依らず、容易に収束し、4極電磁石の値の変化も連続的である。今回の設計においては、弧部の4極電磁石としてF-D-Fという極性を採用することとした。

主LINACを含む直線部と周回部とを繋いだ全体のオプティクス案を図6に示す。これは、on-crest加速、 $R_{56}=0$ の場合である。

5. 今後の課題

線形オプティクスは検討が進んだが、CSRや空間電荷などの集団効果を含む非線形オプティクスは現

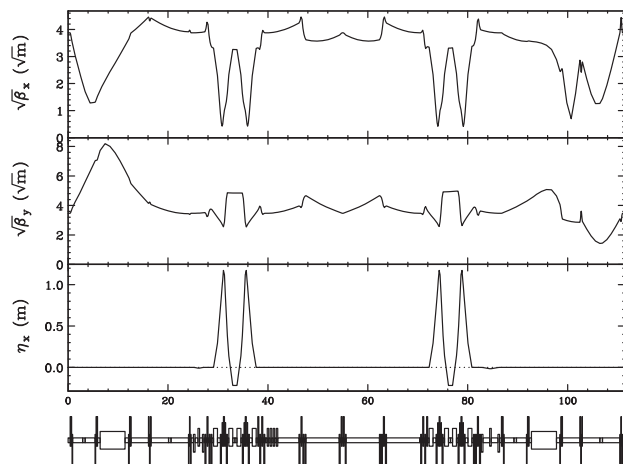


図6：周回部のオプティクス

在のラティスに対しては、まだ検討が進んでいない。また、主LINACだけでなく、入射部についても建設時はエネルギーが下げられる可能性もあり、入射部とのマッチングも今後の課題である。

2012年度中にビーム運転を開始する為には、2011年度中に電磁石や真空系、診断系を製造する必要がある。真空系や診断系の配置もこれからの課題である。

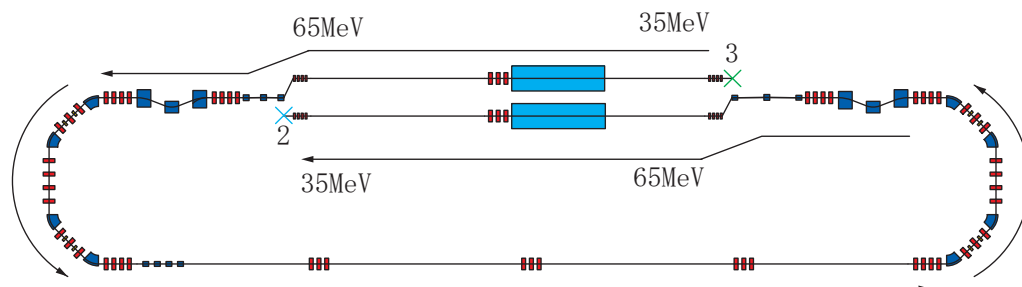
参考文献

- [1] S.Sakanaka, et al., "Recent Progress in the Energy Recovery Linac Project in Japan", Proceedings of IPAC2010, pp.2338-2340, 2010
- [2] R.Hajima et al. (ed.), "コンパクト ERL の設計研究", KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032.
- [3] M.Shimada, Y.Kobayashi, "LATTICE DESIGN OF 2-LOOP COMPACT ENERGY RECOVERY LINAC", 第6回加速器学会年会プロシーディング, 2009
- [4] T.Shiraga, "コンパクト ERL 電子ビーム光学系の設計研究", 修士論文, 東京大学, 2009年3月

A. 非対称2ループへのマッチングの拡張

参考として、非対称2ループへのマッチング方法の拡張について述べる。

2ループの場合、主LINAC直線部をビームは4回通過する。ここで検討した1ループのラティスに2ループ目を加えた場合、1回目は入射部からの5MeVビームを35MeVへ加速して内側ループへビームを通し、2回目はそのビームを65MeVまで加速して外側ループへ回す。3回目はそれを65MeVまで減速して内側ループへ戻し、最後の4回目で5MeVまで減速し、ビームダンプへ打ち込むのである。2ループ全体をマッチングして繋ぐ為には、1ループの計算の後で、もう1段階の計算を加えるだけでよい。光学関数を繋ぐポイントは4点で、1ループの場合も2ループの場合も同じである。外側ループを繋ぐの必要な計算は、図A1に示すラティスに対して行われる。（ただし、図に示した様な分岐シケインを含むラティスは旧案であり、現在は敷地の広さの関係で、分岐シケインがない、よりコンパクトなラティスとなっている。）光学関数を繋ぐ為には、内側ループの出入口の光学関数をそのまま適用する必要がある。すなわち、図1の"3"から初めて、"2"に繋ぐことになる。また、主LINACを含む直線部と、分岐偏向電磁石直線までの4極電磁石の値は、内側ループに対する値をそのまま使い、変化させて

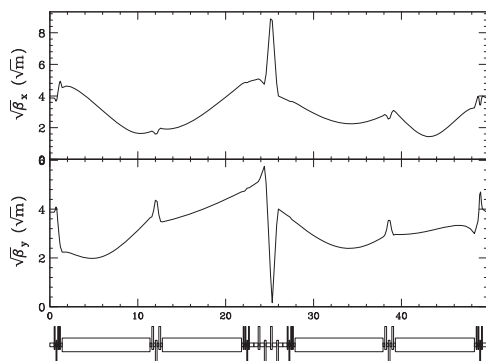


図A1：外側ループの追加

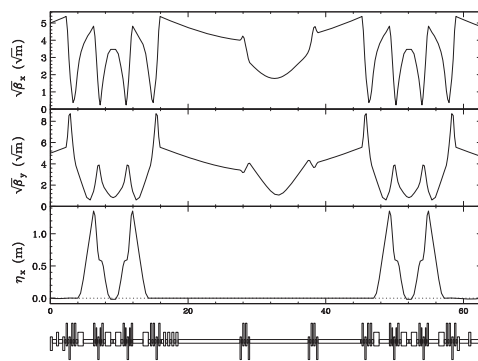
はいけない。つまり、入り口の光学関数である”3”点から、分岐が終わる部分までは、外側ループのマッチングに対して使ってはならないということになる。主 LINAC 直線部の 4 極電磁石は、入射ビームや、初段の加速のビームに対して最適化されている為、外側ループのエネルギーが高いビームに対しては影響が少ない。従って、この方針で設計を行う場合、初期値”3”点や終端値”2”点の光学関数の選び方が重要ということになる。4 極がほとんどなくとも外側ループ入り口までうまくビームを転送できる様な初期値が目安である。

全体の方針を含めて検討不十分な面がまだ多くあるが、この方針で設計した旧案に対するオプティクスを図 A2 に示す。図は 245MeV の場合である。

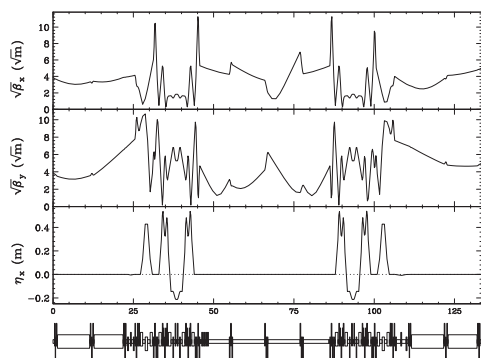
(a) 主 LINAC 直線部



(c) 内側ループ



(c) 加減速を加えた外側ループ



(d) 全体

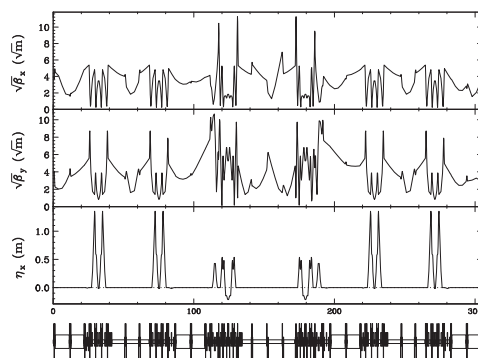


図 A2 : 周回部のオプティクス