1. Linac Beam の基礎

Masanori SATOH
KEKB Linac Cont. G., KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

1-1. Linac とは何か？

Linac(Linear Accelerator)とは、粒子加速器と呼ばれる実験装置の一種である。粒子加速器とは、荷電粒子を加速する装置であり、形状・加速方式・対象とする荷電粒子の種類により区分すると：

加速粒子：
Lepton（e.g. 電子/陽電子）
Hadron（e.g. 陽子/反陽子）
Heavy Ion

加速器の形：
円形加速器 (蓄積リング、サイクロトロン、シンクロトロン)
線形加速器(Linac) (入射器、リニアコライダー、医療用、工業用滅菌装置、FEL)

加速方式：
静電場加速 (Cockcroft-Walton, Van de Graaff)
高周波 (RF) (Sband 2856-MHz, Cband 5712-MHz, Xband)
先端的加速方式 (Laser wake,)

KEKB Linac は、電子・陽電子を 2856-MHz の RF で加速する線形加速器であり、主な運転目的は KEKB ring へのビーム供給である(入射器といわれる所以)。

1-2. Linac の構成要素

図１に、KEKB Linac のレイアウトを示す。KEKB Linac は、全長約 600-m の線形加速器であるが、特徴的なことに 180° 偏向部（アーク部）を備えている。これは、KEKB 建設時のアップグレード（エネルギー増強）時に、建設地の制約からこのような形となった。ビーム運転は 24 時間体制で行われ、４つの異なるリング(KEKB 電子・陽電子/ PF, PF-AR)へビームを供給している。

Linac の主な構成要素として、下記の物がある。

(1) 電子銃
・加速粒子である電子を発生させる源である(図２)。KEKB Linac では、多孔性のタングステン基盤にバリウムを含浸したもので、1000℃以上の高温で熱し、200-kV の高電圧で電子を引き出す。CNT(カーボンナノチューブ)を応用した電子銃の R&D も進行中である。

(2) クライストロン
・電子ビームを加速するための RF 源である(図３)。高周波の発生・増幅に用いる真空管の一種であり、増幅率が大きく、大電力の高周波を得やすい。KEKB Linac の運転では、Sband(2856-MHz)クライストロンを 60 本使用している（最大出力 50-MW）。また、Cband クライストロンを 1 本設置している（R&D 及び運転予備機として）。さらに、Xband の R&D も進めている。

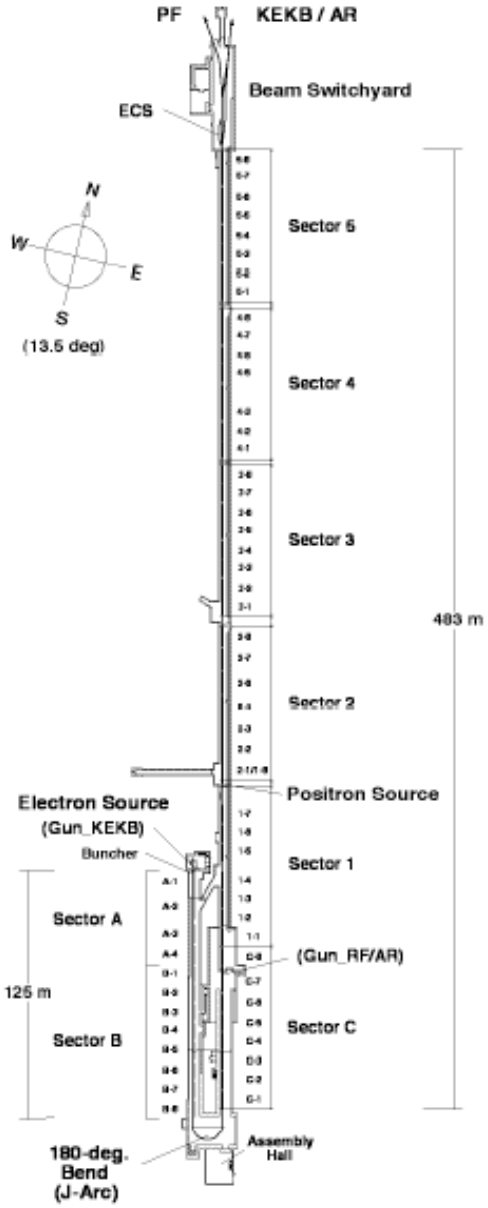

図１：KEKB Linac のレイアウト

(3) 加速管
・Linac のビームラインへ多数設置され（KEKB Linac では 2-m 加速管を約 240 本使用）、クライストロンからの大電力 RF を蓄積する。これと同時にビームが加速管を通過すると、ビームは加速される（エネルギーを得る）。図４の写真のように、１本の加速管は、多数の小空洞が結合された構造となっている。

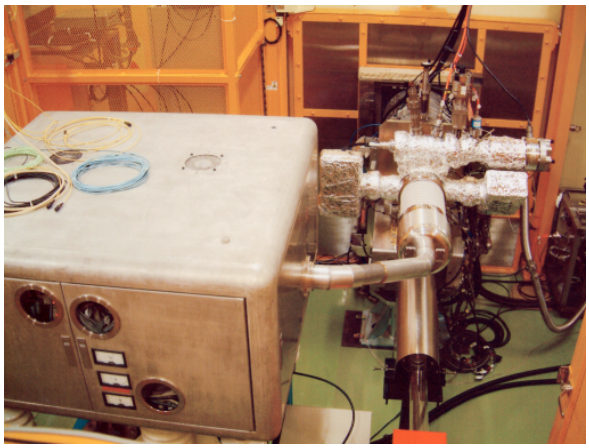

図２：電子銃の写真

図３：クライストロンの写真

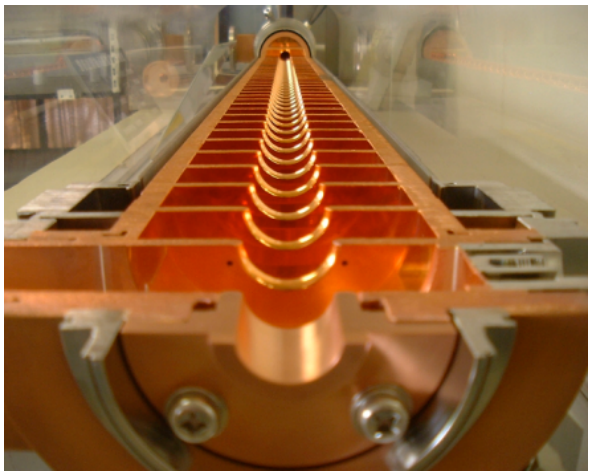

図４：加速管カットモデルの写真

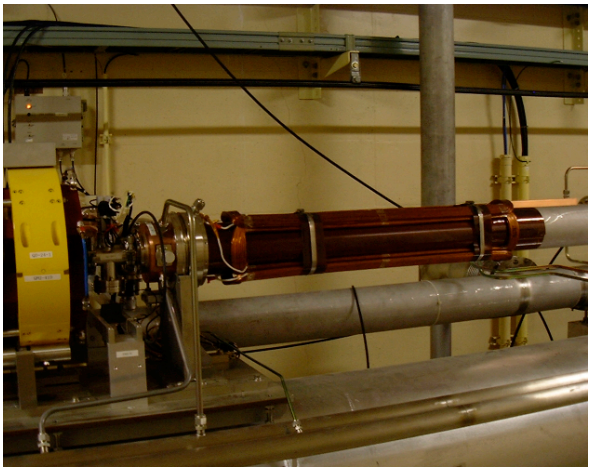

図５：電磁石の写真(四極及びステアリングマグネット)

(4) 電磁石

・電子ビームに kick を与え、軌道やサイズを調整するためには、電磁石磁場によるローレンツ力を用いる。Linac で主に使用される主な電磁石は、

(a) 偏向電磁石 (Bending magnet)
(b) 四極電磁石 (Quadruple magnet) (図６)
(c) 補正電磁石 (Steering magnet)

などである。(a)は、ビーム輸送の理想軌道を決定し、KEKB Linac ではアーク部等で用いられる。また、シケイン（エネルギー幅やビーム長圧縮装置）にも用いられる。(b)はビームサイズを水平方向（垂直方向）に収束させるために用いる。(c)は、電子ビームの軌道調整に用いるために使用する。理想的な電子ビーム軌道は、Linac に沿って中心付近を真っ直ぐ通る物であるが、現実には磁石の設計・設置誤差や Wakefield などの摂動により、理想軌道からはずれてしまう。これは、Linac 下流へのビーム透過率減少ひいてはビームラインの放射化の原因となるため、通常補正電磁石による軌道補正が行われる。

(5) その他のコンポーネント

・Linac の代表的なコンポーネントとしては、上述した(1)～(4)以外に、加速管やクライストロン等を真空に保つための真空ポンプ類や、陽電子源である陽電子生成ターゲット（タングステン等が用いられる）などがある。また、安定なビーム運転のために非常に重要なコンポーネントとして、様々なビームモニタがあるが、詳細は次章を参考にされたし。

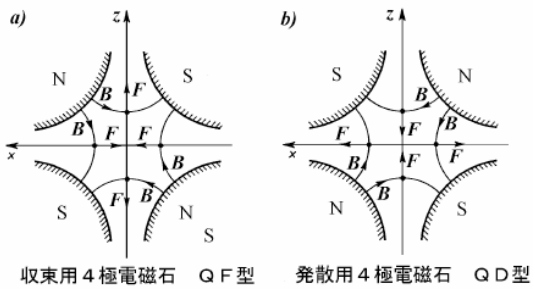

図６：四極電磁石における磁場と粒子に働く力。（OHO’03 加速器電磁石入門/遠藤有聲著より転載）

1-3. Linac Beam の運動

ビームの運動（軌道）を記述するための簡単な方法として Transfer Matrix（転送行列）の表現方法がある。

いま、場所 $s_0 \rightarrow s_1$ 間でのビーム軌道(x, x')を考えるとき、s_1 におけるビーム軌道は、s_0 での軌道及び転送行列 M を用いて下記の通り表現できる。

$$\begin{pmatrix} x(s_1) \\ x'(s_1) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

簡単な例として、ドリフトスペース(s_0 <=> s_1 間に、磁石が無い場合)を考えると、

$$\begin{cases} x(s_1) = x(s_0) + x'(s_0)L \\ x'(s_1) = x'(s_0) \end{cases} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

より、

$$M_{Drift} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

となる。ここで、L はドリフト長(s_0, s_1 間距離)を表す。

次ぎに、磁場中を通過するビームの運動を考えると、運動方程式は

$$\frac{d^2x}{ds^2} + K(s)x = 0 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

と表現できる。ここで K(s)は磁場による収束力であり、（詳しい導出方法は、過去の OHO など数多くある優れた教科書を参照して下さい。）

(a) QF(x 方向に収束する四極電磁石) K>0 の場合：

$$M_{QF} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{K}L) & \frac{1}{\sqrt{K}}\sin(\sqrt{K}L) \\ -\sqrt{K}\sin(\sqrt{K}L) & \cos(\sqrt{K}L) \end{pmatrix} \text{(Eq. 5)}$$

(b) QD(y 方向に収束する四極電磁石) K<0 の場合：

$$M_{QD} = \begin{pmatrix} \cosh(\sqrt{|K|}L) & \frac{1}{\sqrt{|K|}}\sinh(\sqrt{|K|}L) \\ -\sqrt{|K|}\sinh(\sqrt{|K|}L) & \cosh(\sqrt{|K|}L) \end{pmatrix} \text{(Eq.6)}$$

と書ける。ここで、K を 0 に近づけると、ドリフト空間の転送行列(Eq.3)になることが分かる。

次に、thin lens 近似について述べておく。上では磁石の長さを L として考えたが、光学同様にコンポーネントの長さゼロ（点）として考える thin lens 近似が良く用いられる。いま、K=B'/(Bρ)であり、KL を一定に保ちながら L がゼロになる極限を考えると、

$$M_{QF} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -k & 1 \end{pmatrix}, \quad M_{QD} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

と書ける (k=KL)。これは、焦点距離 f=1/k の凸（凹）レンズと見なすことが出来る。但し、電磁石の場合には、水平方向に収束力があるとき、垂直方向には発散力が働くことに注意する（光学レンズとの違い）。

ビームが図 7 の様な偏向電磁石を通過する場合の運動を考える(ρ: 曲率半径、θ: 曲げ角)。(Eq. 4)において $K=1/\rho^2$ とすれば、転送行列は、

$$M_{Bend} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \rho\sin\theta \\ -\frac{1}{\rho}\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \qquad \text{(Eq. 8)}$$

と書ける。ここで、ビームと偏向電磁石の端面は垂直である様な磁石（セクター電磁石）を考えたが、実際の電磁石は矩形型であり、磁石の端面がビームに与える収束力を考える必要がある。

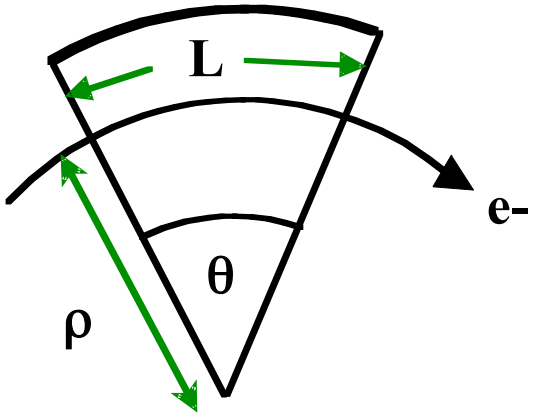

図 7 ：偏向電磁石

ここで、下記（図８）の様な、Q 磁石とドリフトスペースから成る単純なビームラインを考える(FODO ラティスと呼ばれる)。ビームが左から右へやってくる場合を考えると、転送行列は、

$$M_{FODO} = M_{Drift} M_{QD} M_{Drift} M_{OF} \qquad \text{(Eq. 9)}$$

と表現できる。この様に、個々のコンポーネントの転送行列と配置が与えられた場合、Linac 全体（或いはリング全周）の転送行列が容易に求められる。

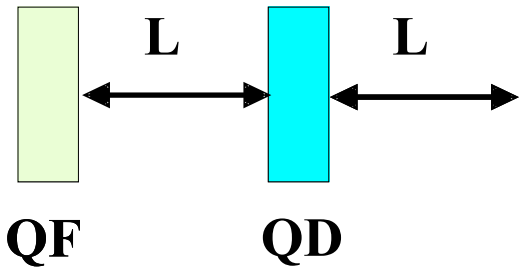

図８ ：FODO ラティス

(*) ラティス(Lattice)とは、加速器における磁石コンポーネントの並びの事であり、オプティクス(Optics)とは、ビームが受ける力（すなわち磁場）の分布を意味する。すなわち、同一 Lattice であっても、異なる Optics は無限にある。