

# 残留ガスとの散乱によるビームロス

東京大学物性研究所

中村典雄

# 目的

- ERLにおけるビームと残留ガスの散乱によるビームロス进行评估し、ERL実証機的设计に反映させる。
- 今回は、特にリターンループ部に絞ってビームロスを計算し、真空システム(真空度、真空チェンバー口径等)への要件を考える。
- また、ビームエネルギーやオプティクスなどのビームパラメータの影響についても検討する。

# 残留ガスとの断面積

原子(原子番号 $Z_i$ )との散乱によってビームロスする断面積

(A) Rutherford散乱

$$\sigma_R(Z_i, s) = \frac{4\pi Z_i^2 r_e^2}{\gamma^2 \theta_c(s)^2}$$

(B) Möller散乱

$$\sigma_M(Z_i, s) = \text{Max} \left\{ \frac{2\pi r_e^2 Z_i}{\gamma(\Delta p/p)_c(s)}, \frac{4\pi r_e^2 Z_i}{\gamma^2 \theta_c(s)^2} \right\}$$

(C) 制動輻射

$$\sigma_B(Z_i, s) = 4\alpha Z_i(Z_i + 1)r_e^2 \left\{ -\frac{4}{3} \ln(\Delta p/p)_c(s) - \frac{5}{6} \right\} \ln(183Z_i^{-1/3})$$

$\theta_c$ : 角度のアクセプタンス  $(\Delta p/p)_c$ : 運動量アクセプタンス

$r_e$ : 古典電子半径  $\alpha$ : 微細構造定数  $\gamma$ : ローレンツ因子

# アクセプタンス

アクセプタンスは散乱場所( $s$ )に依存する。

(A) 角度アクセプタンス

$$\frac{1}{\theta_c(s)^2} = \underset{\bar{s} > s}{Max} \left\{ \frac{\beta_x(s)\beta_x(\bar{s})}{2a_x(\bar{s})^2} + \frac{\beta_y(s)\beta_y(\bar{s})}{2a_y(\bar{s})^2} \right\} \quad (\text{楕円チェンバー仮定})$$

(B) 運動量アクセプタンス

$$(\Delta p/p)_c(s) = \underset{\bar{s} > s}{Min} \left\{ \frac{a_x(\bar{s})}{|\eta_x(\bar{s})| + h(\bar{s}, s)} \right\}$$

$$h(\bar{s}, s) = \sqrt{\beta_x(\bar{s}) \frac{\eta_x(s)^2 + (\alpha_x(s)\eta_x(s) + \beta_x(s)\eta_x'(s))^2}{\beta_x(s)}}$$

非線形磁場及びベータatron振動の位相の効果は無視  
(オーダー評価)

# 残留ガスとの散乱によるビームロス

各種原子(原子番号 $Z_i, i=1, 2, 3\dots$ )との散乱によるビームロスの割合

$$\frac{\Delta N_{loss}}{N} = \sum_i \left[ \int_C n_G(Z_i, s) \{ \sigma_R(Z_i, s) + \sigma_M(Z_i, s) + \sigma_B(Z_i, s) \} ds \right]$$

$N$ : 全電子数     $\Delta N_{loss}$ : 残留ガスとの散乱により損失する電子数

$C$ : リターンループ部全周     $n_G$ : 残留ガス(原子番号 $Z_i$ )の粒子密度

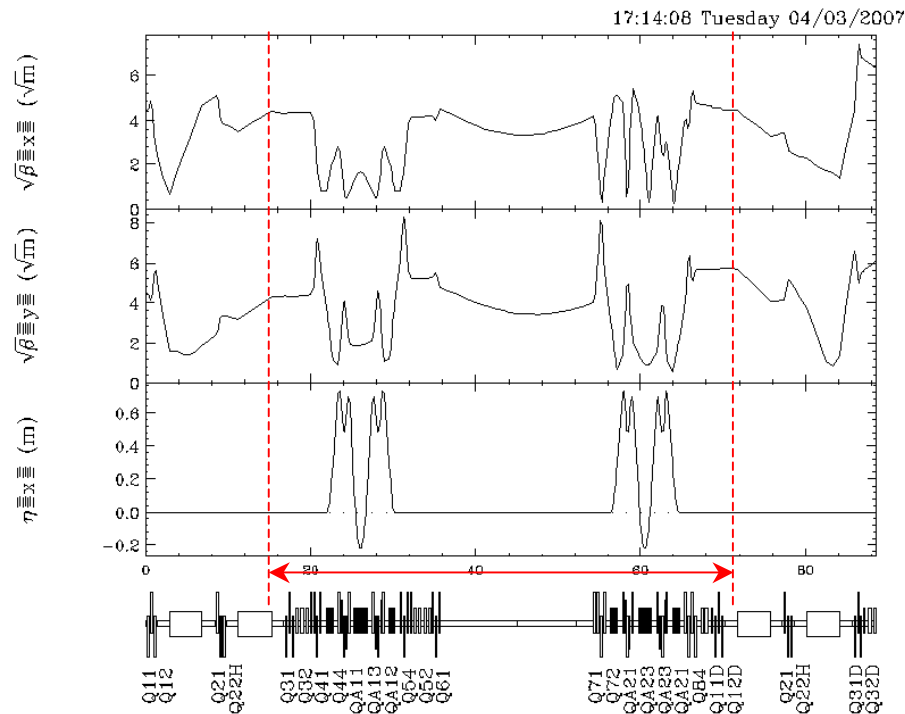
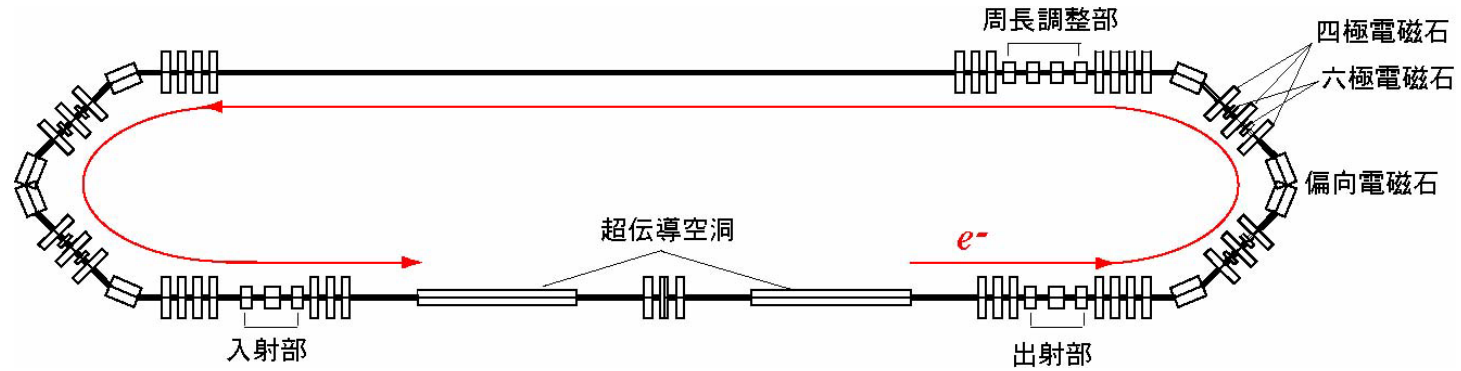
気体の粒子密度 $n_G$ と真空度 $P$ との関係

$$\begin{aligned} n_G(Z_i, s) &= 7.243 \times 10^{24} P(Z_i, s) [\text{Pa}] / T(Z_i, s) [\text{K}] \\ &= 9.656 \times 10^{24} P(Z_i, s) [\text{Torr}] / T(Z_i, s) [\text{K}] \end{aligned}$$

計算の条件

- 真空度は場所に依らず一定  $P(Z_i, s) = P$
- CO ( $Z_1=6, Z_2=8$ ) 換算。
- 温度  $T=300 \text{ K}$

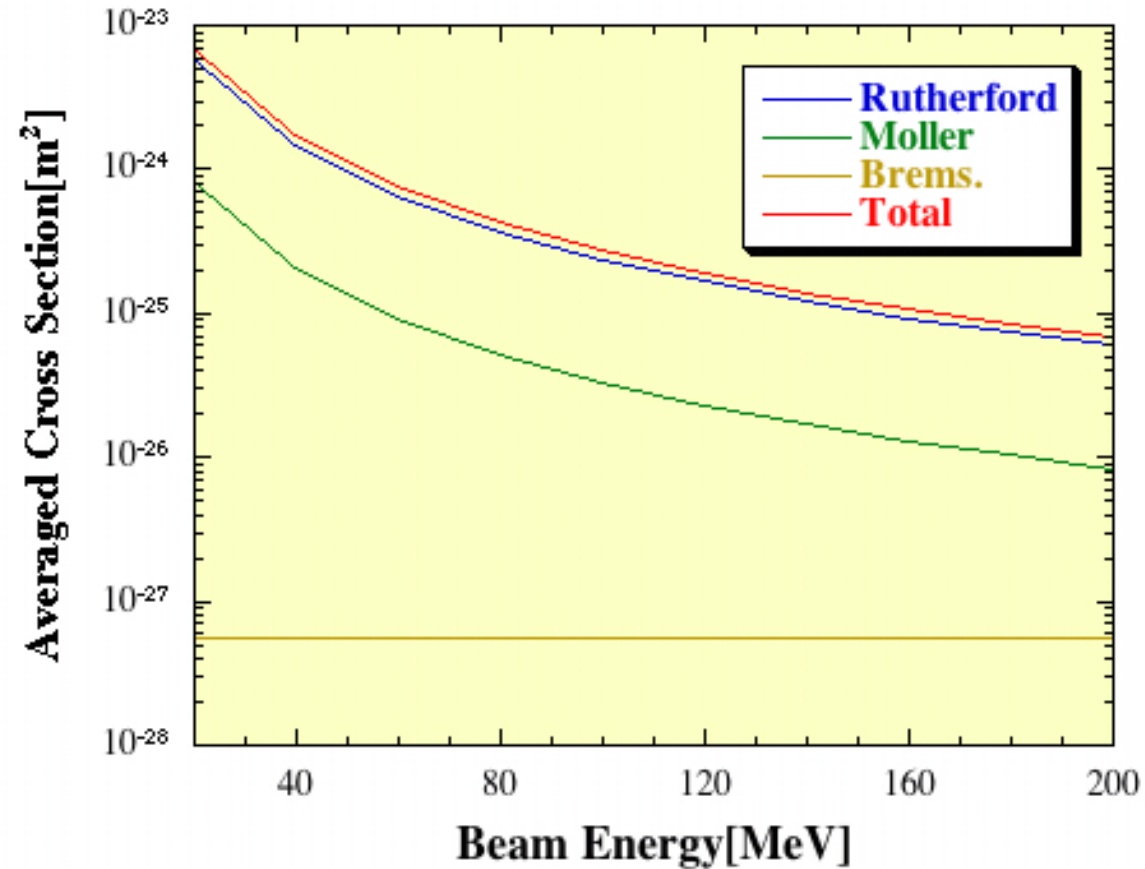
# ERL実証機とオプティクス



超伝導空洞の入口から  
出口までを対象とした。  
(エネルギーは一定)

# 計算結果(1)

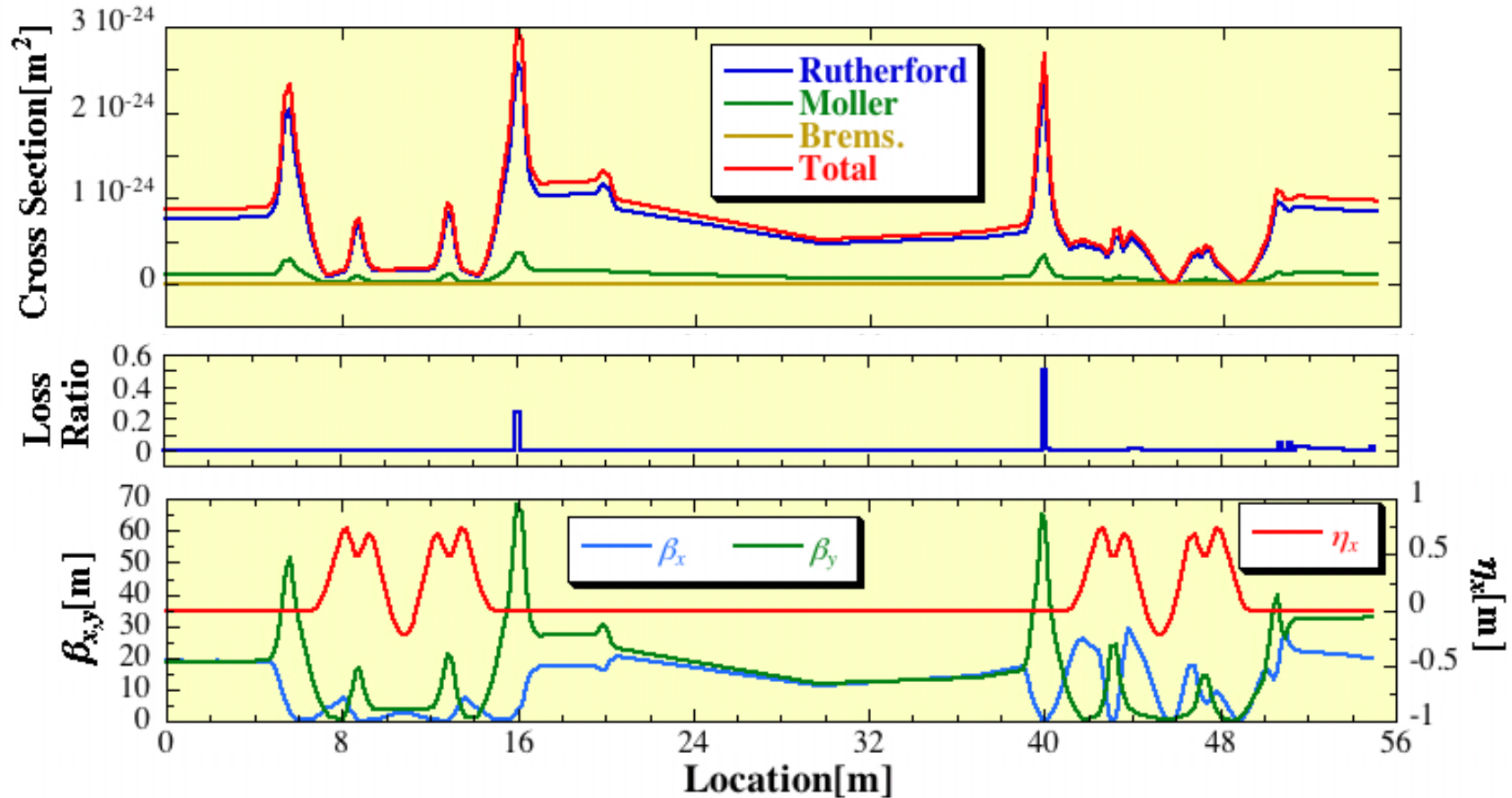
ビームロス断面積のエネルギー依存性( $a_x=25$  mm,  $a_y=25$  mm)



- ・ Rutherford散乱が支配的である(制動輻射は無視できる)。
- ・ ビームロス(の断面積)はほぼエネルギーの2乗に反比例する。

# 計算結果(2)

ビームロス断面積とオプティクス依存性  
( $E=60$  MeV,  $a_x=25$  mm,  $a_y=25$  mm)



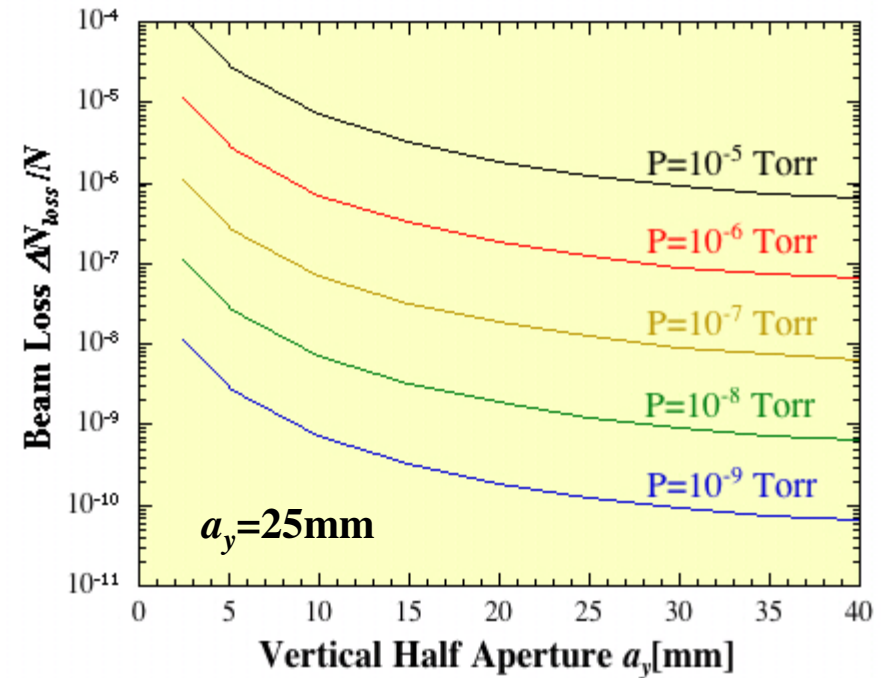
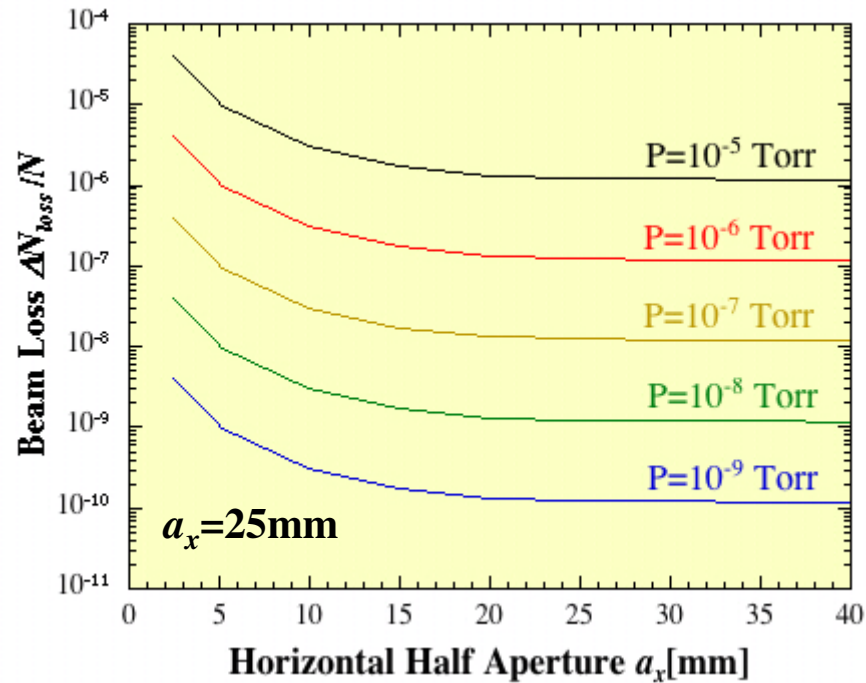
- ・ 断面積とビーム損失場所は垂直方向のベータatron関数と強い相関がある。



# 計算結果(3)

真空度とアパーチャへの依存性

$E=200\text{ MeV}$

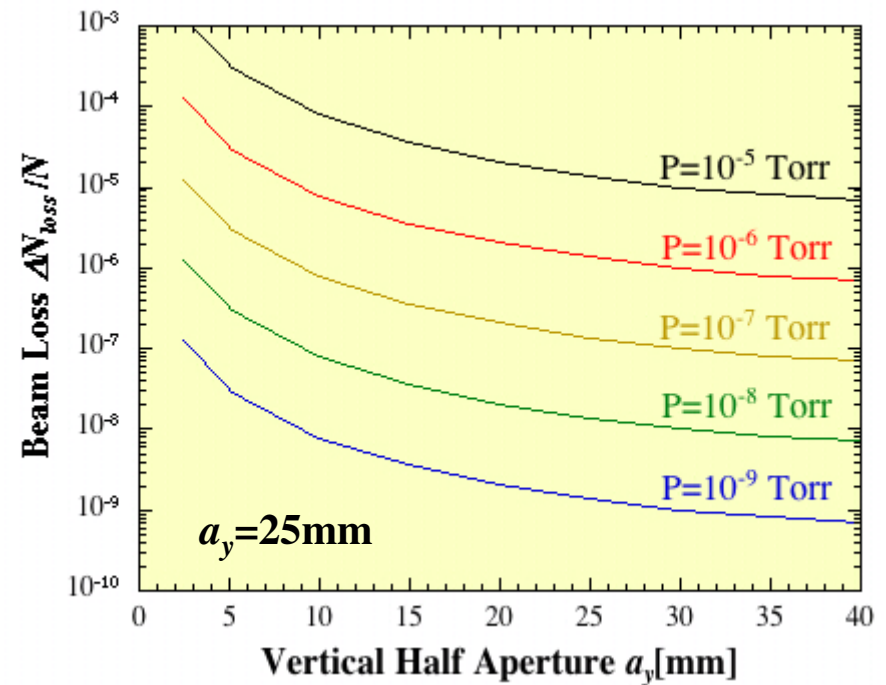
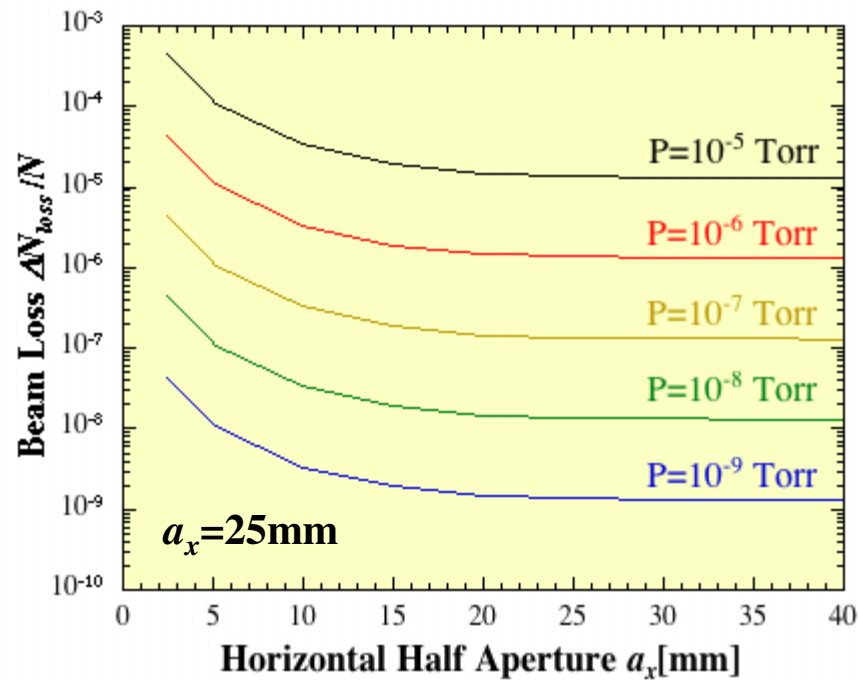


- 放射線安全の要件  $R < 10^{-7}$  (100mA, 200MeV)  $\rightarrow P \leq 10^{-7}$  Torr
- 垂直アパーチャへの依存性が水平アパーチャよりも大きい。

# 計算結果(4)

真空度とアパーチャへの依存性

$E=60$  MeV



- ・ 60MeVではビームロスが1桁増える(放射線安全の条件はより厳しい)。
- ・ ビームロス  $R < 10^{-7}$  ---> 真空度  $P \leq 10^{-8}$  Torr

## まとめ

- (1) ERL実証機のビームエネルギー(60-200MeV)では、残留ガスによるビームロスの原因としてRutherford散乱が支配的であり、ビームロスはほぼエネルギーの2乗に反比例する。
- (2) ビームロスは、散乱により生じる垂直方向の大振幅ベータatron振動によってベータatron関数の大きい場所で起こる確率が高く、水平よりも垂直方向のアップチャにより依存する。アクセプタンスが小さく、ビームロスが起こりやすい場所は数カ所に限定されうる。
- (3) 200MeV、100mAでの放射線の影響を考えると、ビームロスの割合は $10^{-7}$ 以下であることが望ましい(佐々木氏の報告)が、それから要求される真空度は $10^{-7}$ Torrあるいはそれ以下になる。60MeVではよりビームロスが大きいため、同じ電流では真空度への要求もより厳しくなる。