

ビーム寿命 & 不安定性

東京大学物性研究所
中村 典雄

寿命の計算式

$$\text{Beam Lifetime} \quad \frac{1}{\tau_{life}} = \frac{1}{\tau_{Tous}} + \frac{1}{\tau_{Gas}}$$

Touschek Lifetime

$$\frac{1}{\tau_{Tous}} = \frac{\sqrt{\pi} c r_e^2 N_b}{8 \pi^{3/2} \beta^3 (\Delta p/p)_c^2 \sigma_{x'} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot F(\Delta_A)$$

$$F(\Delta_A) = \int \frac{e^{\Delta_A u}}{2u^2} (2u - \ln u - 2) du$$

$$\Delta_A = \left[\frac{(\Delta p/p)_c}{\sigma_{x'}} \right]^2$$

$$\sigma_{x'} = \sqrt{\frac{\sigma_x \sigma_x \sigma_x + \sigma_x^2 \sigma_p^2 + (\sigma_x \sigma_x + \sigma_x \sigma_x')^2}{\sigma_x \sigma_x + \sigma_x^2 \sigma_p^2}}$$

Momentum acceptance

$$(\Delta p/p)_c = \text{Min}\{(\Delta p/p)_{RF}, (\Delta p/p)_{PA}, (\Delta p/p)_{DA}\}$$

Gas-Scattering Lifetime

$$\frac{1}{\tau_{Gas}} = \sum_i \frac{c N_A}{V_0} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{P_i}{760} (\tau_{Coul} + \tau_{Brems})$$

$$\tau_{Coul} = \frac{4 r_e^2 Z_i (Z_i + 1)}{\beta^2 \sigma_c^2}$$

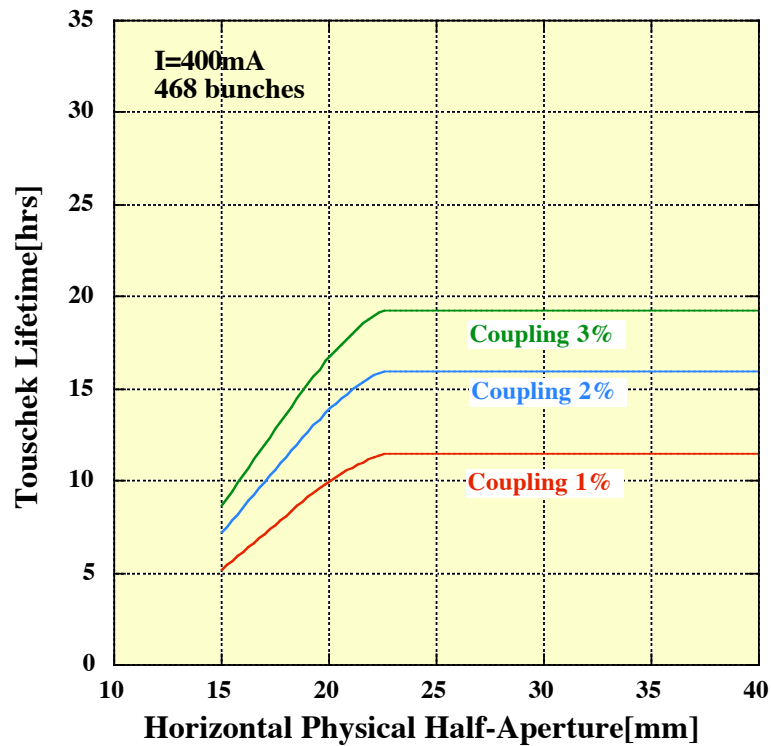
$$\tau_{Brems} = \frac{r_e^2 Z_i (Z_i + 1)}{3hc} \{ [8 \log(\Delta p/p)_c - 5] \cdot \log(183 Z_i^{1/3}) \}$$

Critical kick angle

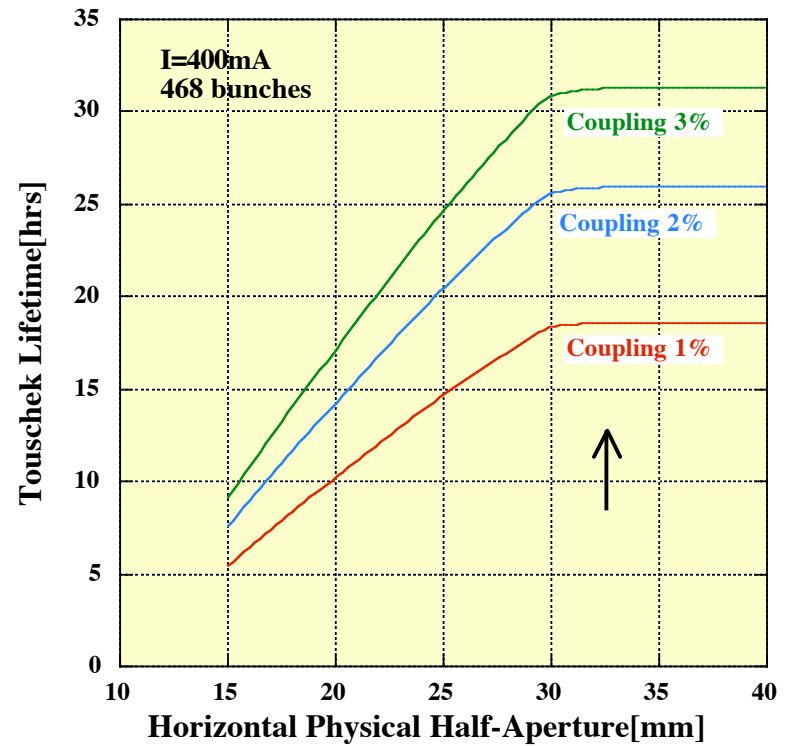
$$\frac{1}{\sigma_c^2} = \frac{\sigma_{x,ave} \sigma_{y,min}}{2 a_{x,min}^2} + \frac{\sigma_{y,ave} \sigma_{y,min}}{2 a_{y,min}^2}$$

Touschek寿命 (1.8GeV)

High-beta Optics



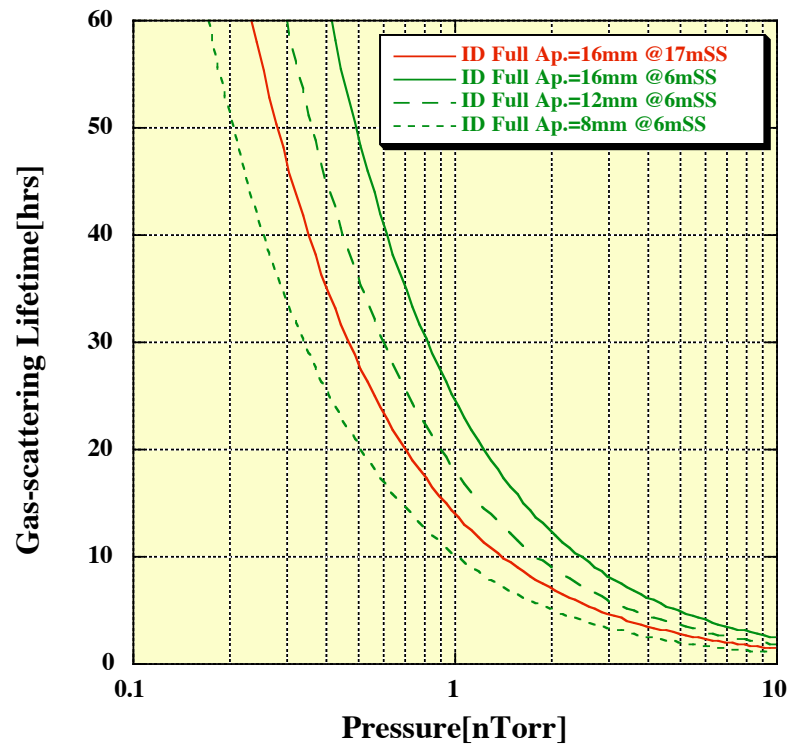
Hybrid Optics



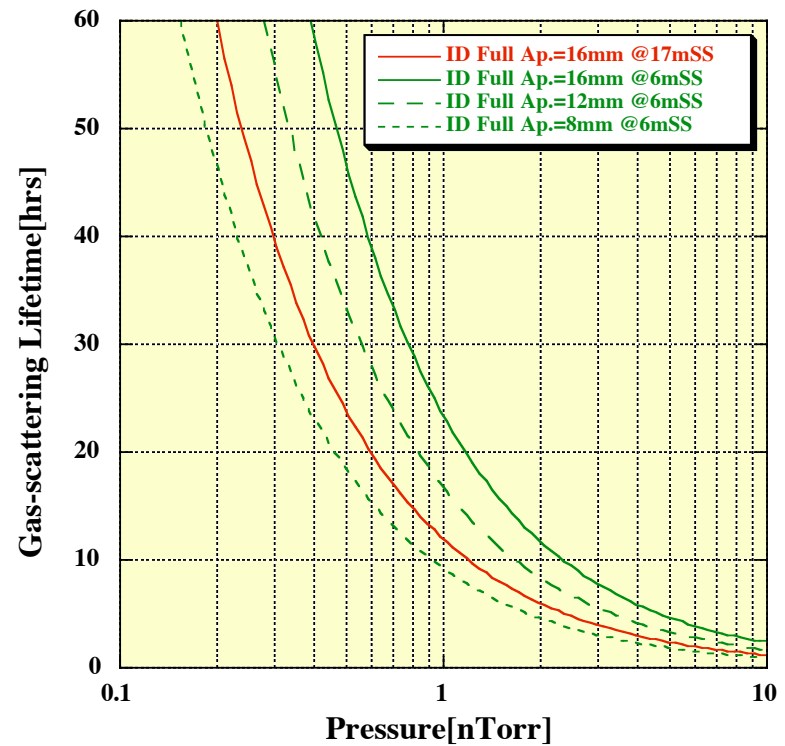
Hybrid Optics (Dyn. Ap. without magnet error)
 Aperture=32.5mm, coupling=1% \square $\square_{Tous} = 18.5$ hrs

Gas-Scattering 寿命 (1.8GeV)

High-beta Optics



Hybrid Optics



Hybrid Optics

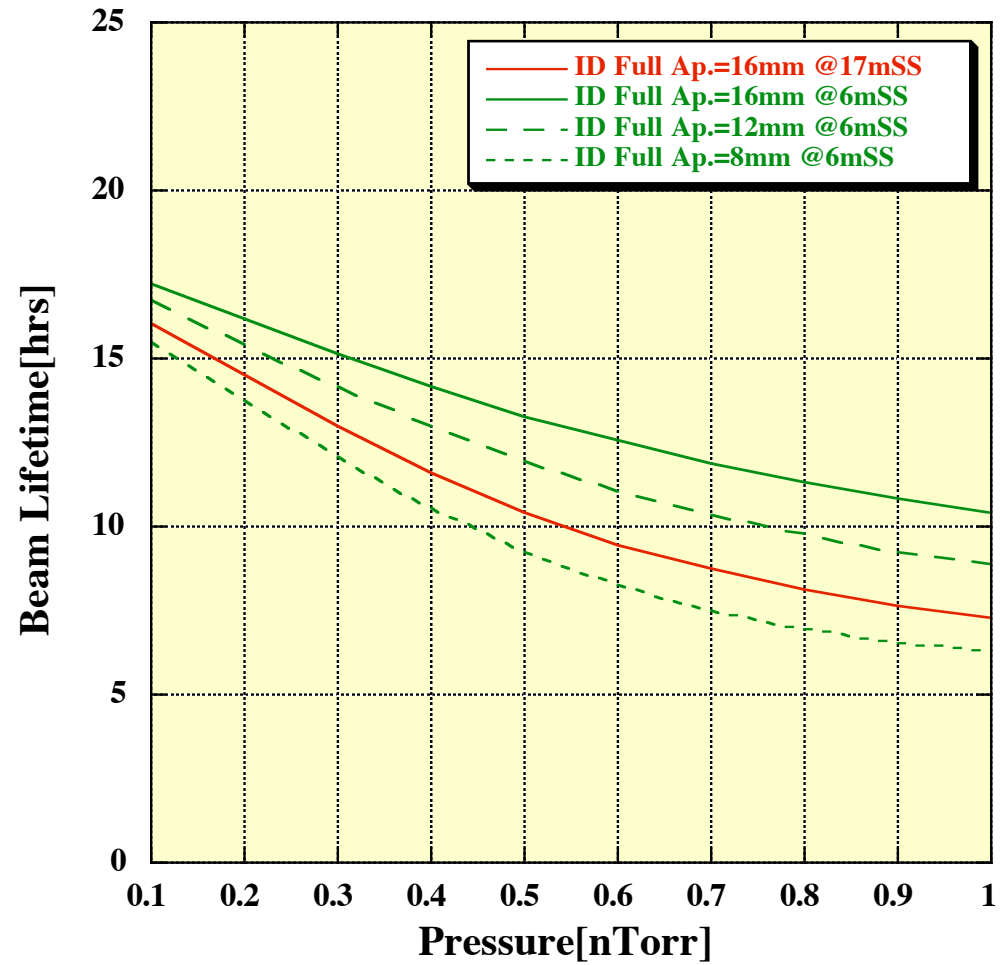
ID gap=16mm@17mSS, Pressure(CO換算)=0.5nTorr

□ □_{Gas}=24 hrs

ビーム寿命 (1.8GeV)

Hybrid Optics
Coupling 1%
Hor. Apert. 32.5mm

$$\frac{1}{\lambda_{life}} = \frac{1}{\lambda_{Tous}} + \frac{1}{\lambda_{Gas}}$$



トップアップ入射とビーム寿命

時間間隔 Δt にビーム寿命で損失する電子数 (全蓄積電子数 N_0 , 寿命 τ_{life})

$$\Delta N_{life} = \frac{N_0 \Delta t}{\tau_{life}}$$

電流安定度 (トップアップ入射間隔 Δt で ΔN_{life} 補う)

全蓄積電流

$$\frac{\Delta I_{total}}{I_{total}} = \frac{\Delta N_{life}}{N_0} = \frac{\Delta t}{\tau_{life}}$$

バンチ電流

$$\frac{\Delta I_{bunch}}{I_{bunch}} = \frac{\Delta N_{life} / n_{inj}}{N_0 / n_{bunch}} = \frac{\Delta t}{\tau_{life}} \frac{n_{bunch}}{n_{inj}} \quad (n_{bunch}=468, n_{inj}=1-30)$$

$$\frac{\Delta I_{total}}{I_{total}} = 0.5 \%, \tau_{life} = 5 - 10 \text{ hrs} \quad \Delta t = 1.5 - 3 \text{ min.}$$

$$\left(\frac{\Delta I_{bunch}}{I_{bunch}} \geq 7.8 \% \right)$$

1 日当り損失する電子数 (入射効率 f)

$$N_{loss} = \frac{24 N_0}{f \tau_{life} [hrs]} = \frac{5.62 \times 10^{13}}{f \tau_{life} [hrs]} \quad \left(f = 1, \tau_{life} = 5 \text{ hrs} \Rightarrow N_{loss} = 1.1 \times 10^{13} \right)$$

バンチ結合型ビーム不安定性

横方向振動（ベータトロン振動）の成長率
 ($a=1,2,3,\dots; \ell=0,1,2,\dots,k_b-1$)

$$g_{\ell,a}^t = \frac{eI_0 f_0 \ell_t}{2E} \cdot \frac{(\ell_t/R)^{2a}}{2^a a!} \cdot \text{Re}[Z_t]_{eff}^{\ell,a}$$

$$[Z_t]_{eff}^{\ell,a} = \sum_{p=0}^{\ell} \frac{\ell_t^p a \ell_s \ell \ell}{\ell_0} \exp\left\{ \frac{\ell_t^p a \ell_s \ell \ell}{\ell_0} (\ell_t/R)^2 \right\} \cdot Z_t(\ell_p^t)$$

$$\ell_p^t = (pk_b + \ell + \ell_t + a \ell_s) \ell_0, \quad \ell \ell = \ell_0 \ell / \ell$$

空洞構造 (Cavity-like Impedance)

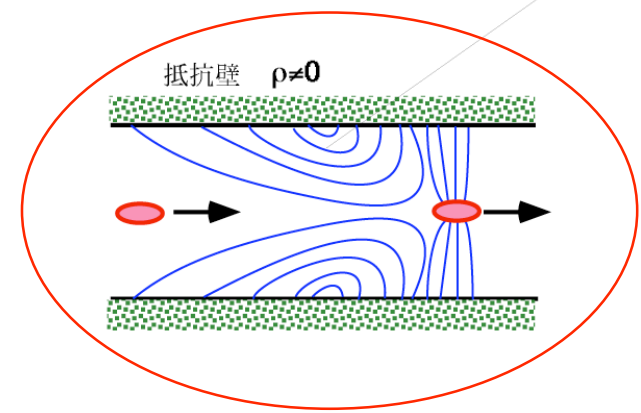
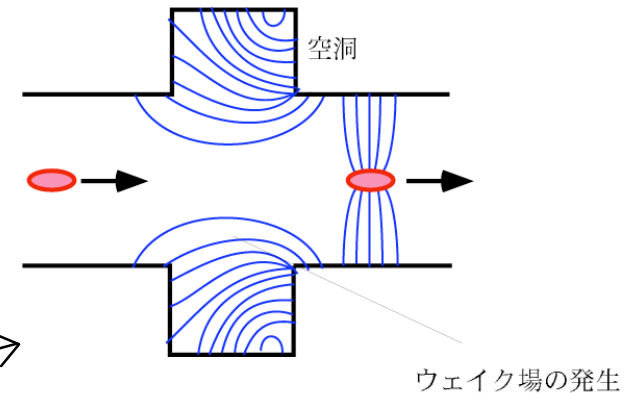
$$Z_t^{CAV}(\ell) = \frac{R_t(\ell_R/\ell)}{1 + iQ(\ell_R/\ell \ell \ell / \ell_R)}$$

抵抗壁 (Resistive Wall Impedance)

$$Z_t^{RW}(\ell) = (\text{sgn}(\ell) \ell i) \frac{Z_0 R}{b^3} \sqrt{\frac{2}{\ell \ell_0 \ell_{el}}} \mu b^{\ell 3} \ell_{el}^{\ell 0.5}$$

ダクト径の3乗とダクト壁の電気伝導度の平方根に反比例

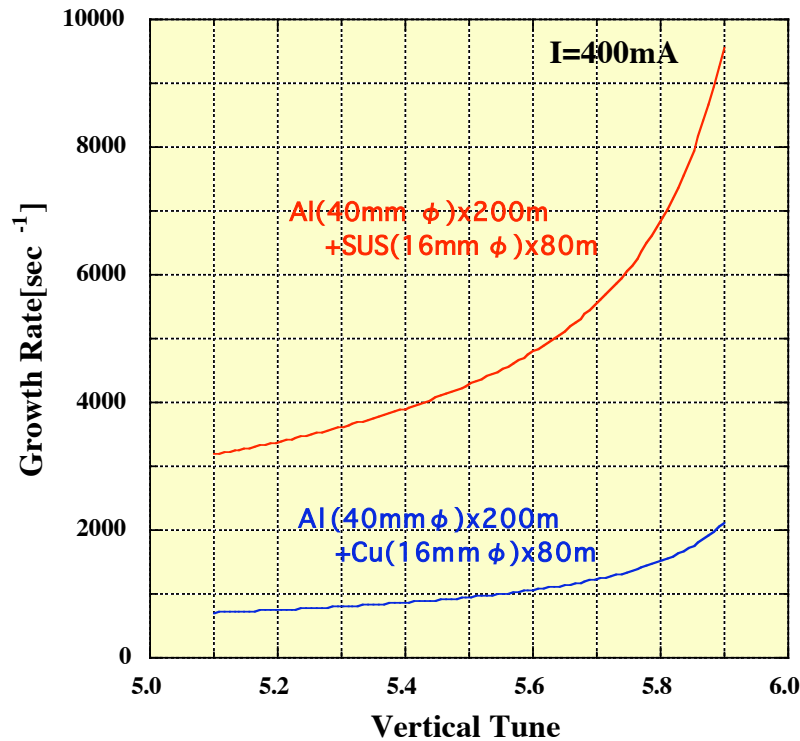
安定の条件 $g_{\ell,a}^t < g_{SR}^t$



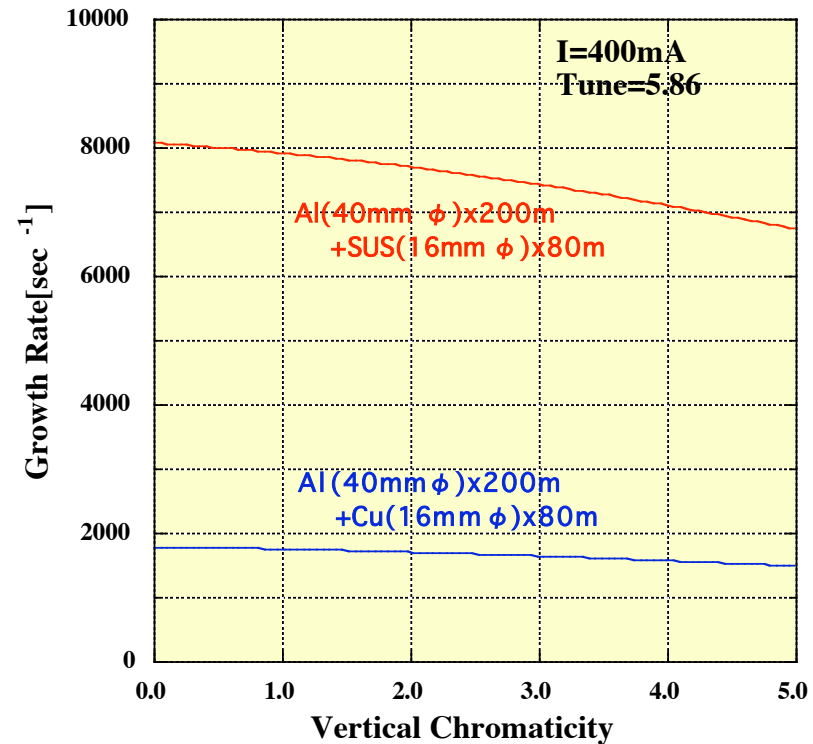
ウェイク場の発生

Resistive wall impedanceによるビーム不安定性

チューン依存性



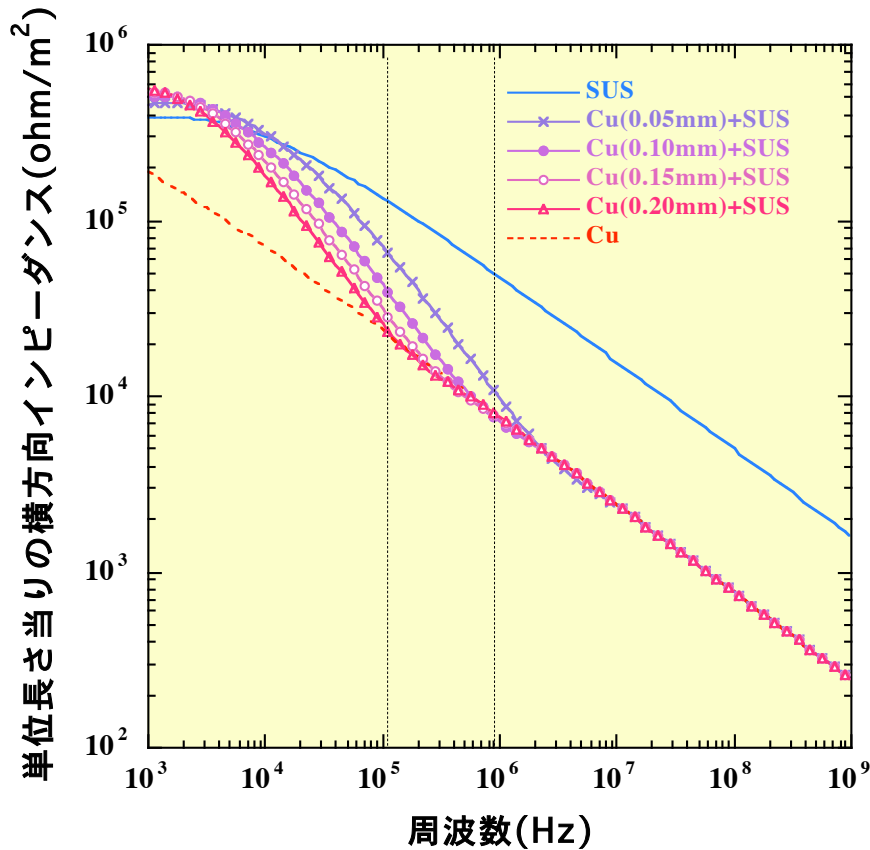
クロマチシティ依存性



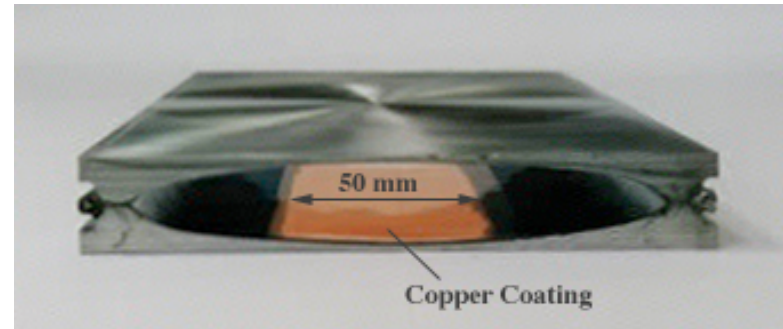
振動の成長率が放射減衰率 ($= 52 \text{ s}^{-1}$) よりはるかに大きい

挿入光源チャンバーによる影響が大きい

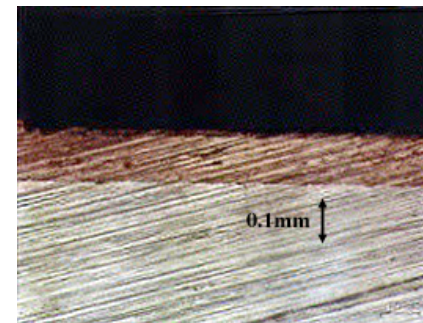
挿入光源用銅メッキチェンバー（１）



銅メッキによるインピーダンスの減少（計算）

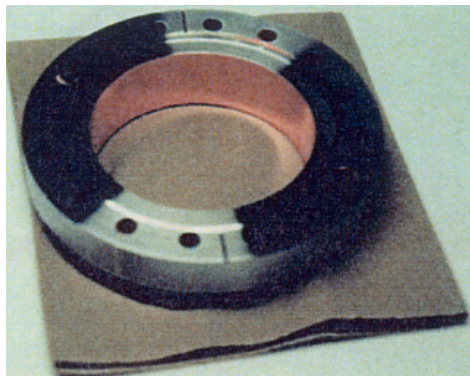


試作チェンバー（SUS+Cu0.1-0.2mm）



試作チェンバーの断面

挿入光源用銅メッキチェンバー（２）

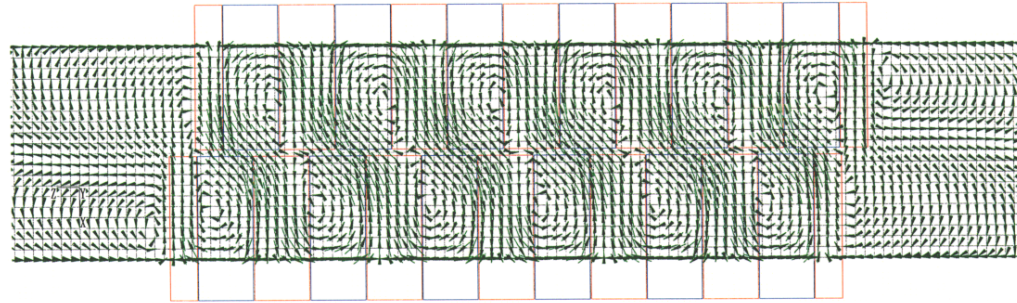


銅メッキチェンバー(溶接前)



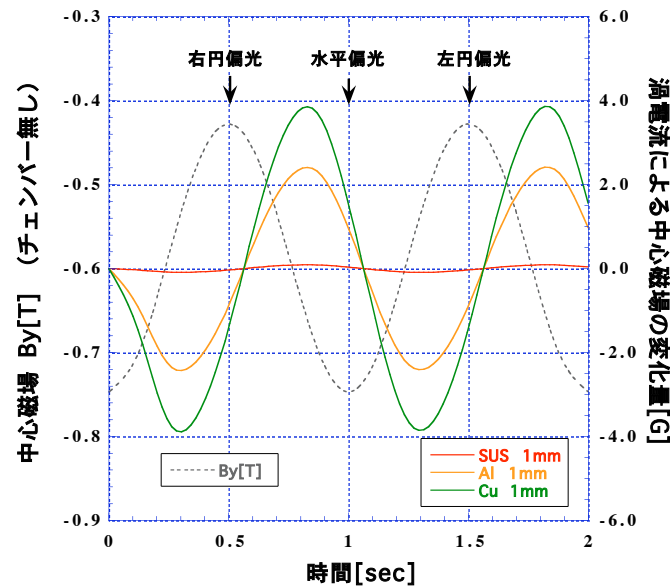
真空試験

挿入光源用銅メッキチェンバー（3）

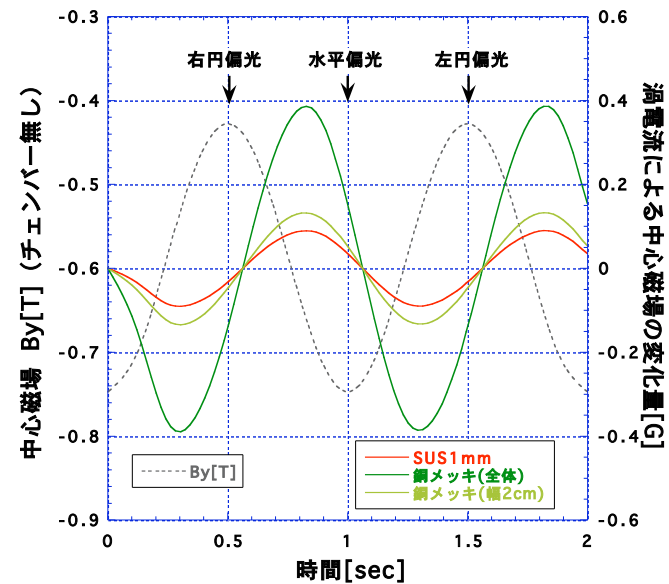


円偏光スイッチング時の真空チェンバーの渦電流

真空チェンバー（厚さ1mm）による渦電流の影響



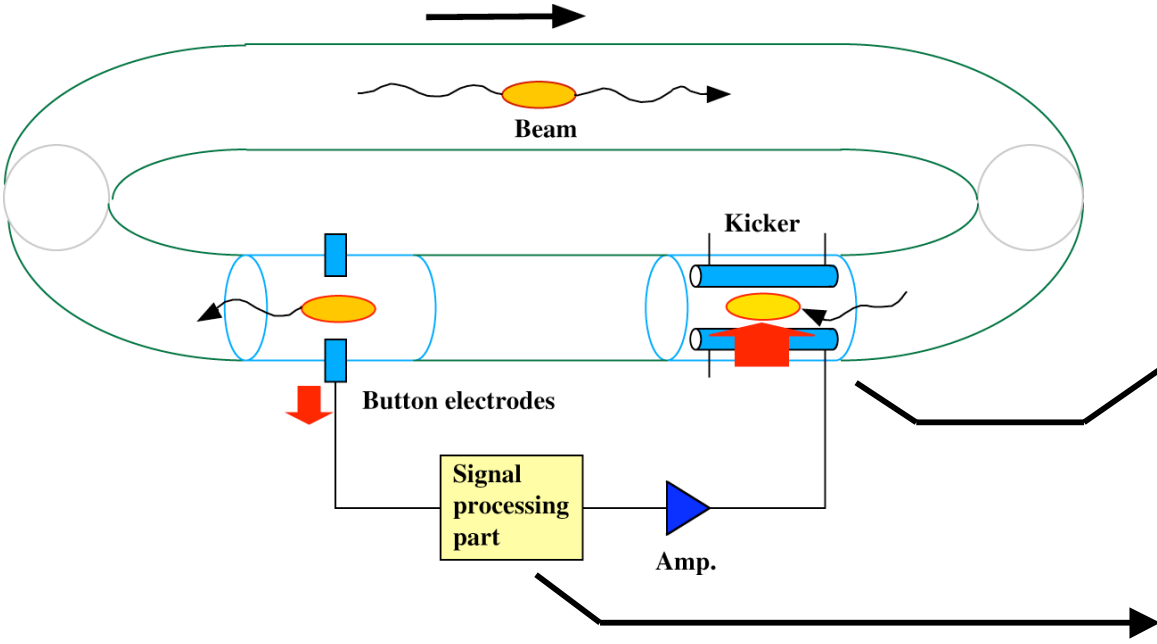
銅メッキ（厚み0.1mm）による渦電流の影響



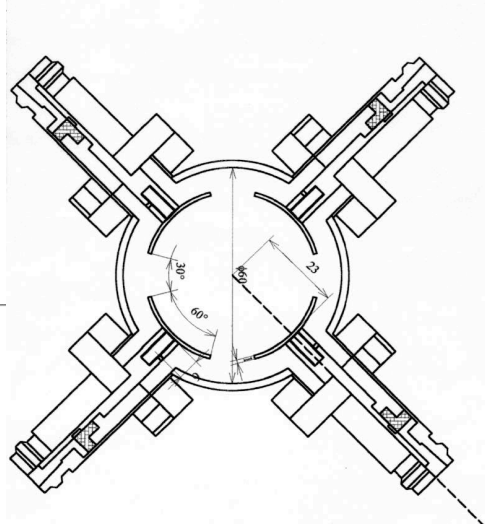
渦電流による磁場誤差

ビーム不安定性用フィードバックシステム

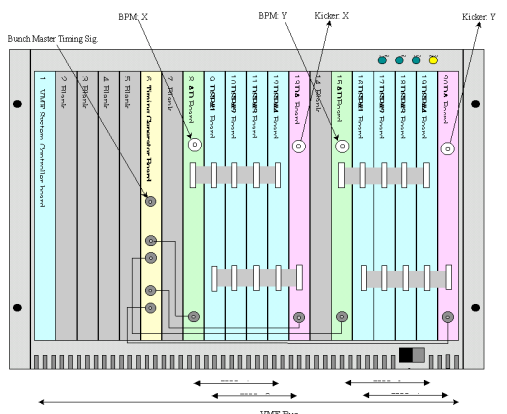
ベータトロン振動の抑制



フィードバックシステム（横方向）



横方向キッカー



信号処理システム

まとめ

- ビーム寿命は、Touschek寿命とGas-Scattering寿命によって決定される。真空度や挿入光源のアパーチャに依存するが、Hybrid Opticsの場合で5 - 10時間になる。
- ビーム寿命は、トップアップ運転において入射の間隔を決めるパラメータであり、トップアップ入射の電流安定度や放射線量（損失する電子数）とも深く関係している。
- 抵抗壁（Resistive wall impedance）によるビーム不安定性が生じる可能性がある。アパーチャが狭く電気伝導度が低い挿入光源用真空チェンバー（SUS製）の寄与が支配的になる。
- ビーム不安定性対策として、内面を銅メッキ（100-200 μ m）された挿入光源真空チェンバーの開発及び横方向フィードバックシステムの設計を行っている。