

極短周期アンジュレータの設置に最適化した 小型電子蓄積リングの設計

DESIGN STUDY OF SMALL ELECTRON STORAGE RING FOR INSTALLATION OF VERY SHORT PERIOD UNDULATORS

大熊春夫^{A), B)}, 山本 樹^{C), D)}

Haruo Ohkuma^{A), B)}, Shigeru Yamamoto^{C), D)}

^{A)}高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Center (JASRI)

^{B)} あいちシンクロトロン光センター

Aichi Synchrotron Radiation Center

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構、放射光

Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy
Accelerator Research Organization, KEK

^{D)} 総研大、物質構造科学

Department of Materials Structure Science, SOKENDAI (The Graduate
University for Advanced Studies)

内容

1. 目的とリングの設計条件
2. 14セルラティスの概要
3. 電磁石について
 - ・四極電磁石
 - ・六極電磁石
 - ・Combined偏向電磁石
4. ダイナミックアパチャー、チューン、クロマティシティ
5. ビーム寿命の見積り
 - ・Touschek寿命
 - ・ガス散乱寿命
6. アンジュレータ スペクトル
7. まとめ

目的

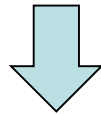
アンジュレータビームラインを主体とした低エネルギー小型リングの検討

- ・極短周期アンジュレータを数多く設置する

極短周期アンジュレータの特長

周期長 2 – 6 mm → L = 0.7 m で周期数 350 - 115

十分な磁場強度を得るためにGap = 2 mm以下とする必要がある



直線部の垂直ベータatron関数 β_y を小さくする必要がある

- ・ここで提案する放射光源が実現できれば、大幅な小型化および低コスト化につながる

設計条件

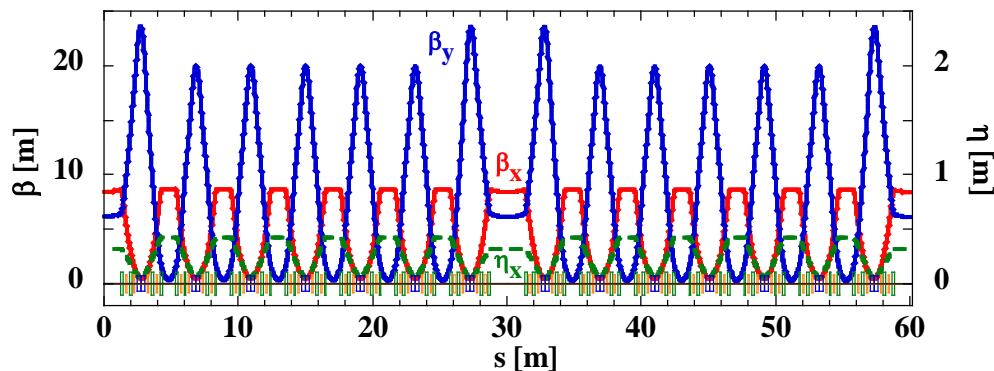
- (1) 電子ビームエネルギー1.5 GeV
(周期長2 mmのIDで基本波として約10keVが実現できる)
- (2) 周長は70 m以下
- (3) 極短周期アンジュレータが10台以上設置
- (4) 直線部の長さは0.8 m以上
- (5) 実効エミッタンスは40 nm·rad 以下
- (6) ギャップ2 mm以下を実現する

ラティス(リング全体)

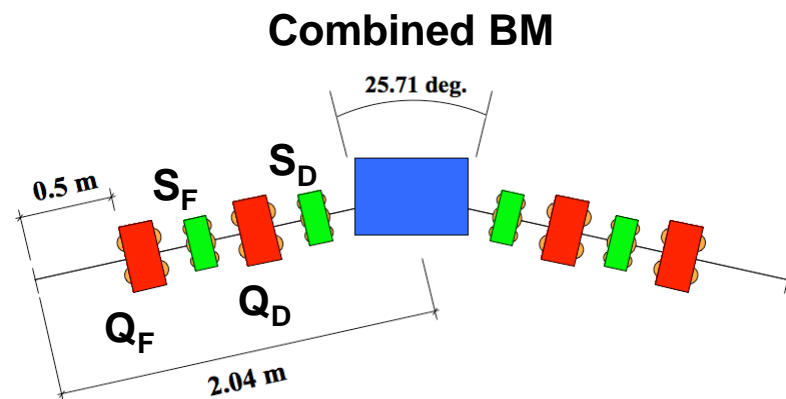
長直線部
(入射)

長直線部
(RF加速)

低 β_y 直線部は
12カ所(L=1.0m)

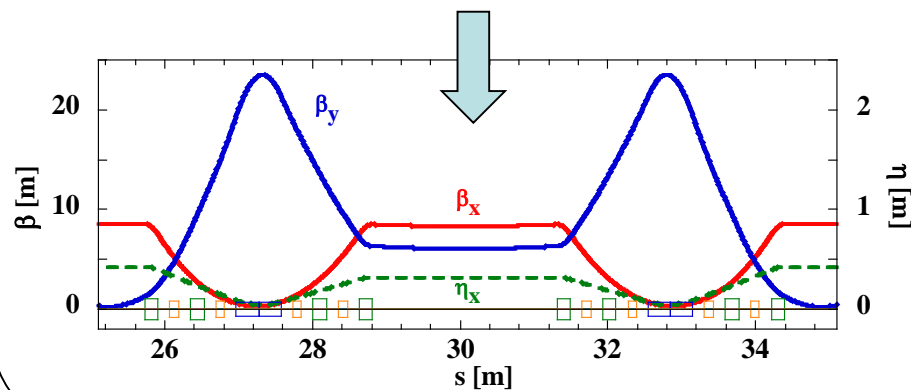


ラティス(ユニットセル)

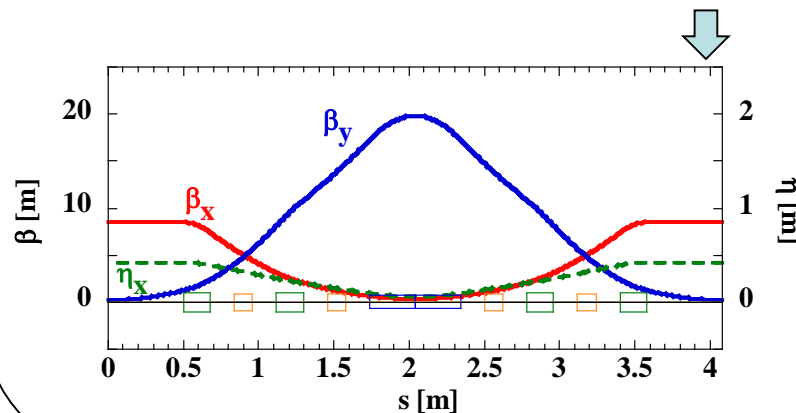


ラティス(長直線セル)

長直線部(L=2.5m)



低 β_y 直線部(L=1.0m)



パラメータ

Energy	1.5 GeV
Circumference	60.12 m
Natural Emittance	23.9 nm.rad
Effective Emittance	35.7 nm.rad
Momentum Compaction Factor	0.006970
Betatron Tune (ν_x, ν_y)	(5.9061, 5.5158)
Natural Chromaticity (ξ_x, ξ_y)	(-11.8, -28.0)
Energy Spread	0.118 %
RF Frequency	498.66 MHz
Harmonic Number	100 = 2² × 5²
Radiation Loss	335.0 keV/turn
Damping Partition Number	J_x 1.217
	J_y 1.000
	J_s 1.783
Damping Time	t_x 1.474 msec
	t_y 1.794 msec
	t_s 1.006 msec

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon \sqrt{1 + \frac{(\eta_x \sigma_\delta)^2}{\beta_x \varepsilon}}$$

パラメータ(続き)

低 β_y 直線部

L	1.0 m
β_x	8.478 m
β_y^{center}	0.243 m
η_x	0.423 m

長直線部

L	2.5 m
β_x	8.290 m
β_y^{center}	6.052 m
η_x	0.319 m

BM

L	0.6 m
B	3.743 T
B'	-7.490 T/m

QF

L	0.18 m
B'	+21.560 T/m

QD

L	0.18 m
B'	-9.376 T/m

ユニットセルの電磁石配置

L[m]		B'/[Bρ] [m ⁻²]	B' [T/m]	ρ [m]	B [T]
0.50					
0.18	QF	+4.30904927	+21.56016181		
0.16					
0.12	SF				
0.16					
0.18	QD	-1.87384726	-9.37572249		
0.16					
0.12	SD				
0.16					
0.60	BM	1.49686411	-7.48950184	1.33690152	3.7425803963
0.16					
0.12	SD				
0.16					
0.18	QD	-1.87384726	-9.37572249		
0.16					
0.12	SF				
0.16					
0.18	QF	+4.30904927	+21.56016181		
0.50					

セル長: 4.08m

長直線セルの電磁石配置

L[m]		B'/[Bρ] [m ⁻²]	B' [T/m]	ρ [m]	B [T]
1.25					
0.18	QL1	+3.87156740	+19.37123815		
0.16					
0.12	SF				
0.16					
0.18	QL2	-0.21579684	-1.07973117		
0.16					
0.12	SD				
0.16					
0.60	BM	-1.49686411	-7.48950184	1.33690152	3.7425803963
0.16					
0.12	SD				
0.16					
0.18	QL3	-0.85137269	-4.25981042		
0.16					
0.12	SF				
0.16					
0.18	QL4	+4.11198541	+20.57416039		
0.50					

セル長: 4.83 m

六極の強さ（典型値）

リング全体のクロマチシティが $(\xi_x, \xi_y) = (+1, +1)$ となるように SF, SD を励磁。

ハーモニック6極は設置していない。2ファミリーのみ。

リング全周で6極の励磁パターンを最適化すれば、より広いダイナミックアパーチャーが得られる可能性もあるが、検討はしていない。

SF	L[m]	0.12
	$B''L/[B\rho][m^{-3}]$	+4.718
	$B''/[B\rho][m^{-3}]$	+39.32
	$B'' [T/m^2]$	+196.72

SD	L[m]	0.12
	$B''L/[B\rho][m^{-3}]$	-8.626
	$B''/[B\rho][m^{-3}]$	-71.88
	$B'' [T/m^2]$	-359.67

Combined Bending Magnet

必要な磁場勾配 (QD成分) を発生させるための
磁極断面形状を計算
ポール間ギャップは82mm

$$E = 1.5 \text{ GeV}$$

$$B_0 = 3.7426 \text{ T}$$

$$B' = -7.4895 \text{ T/m}$$

$$B\rho = 5.0035 \text{ Tm}$$

$$B'/(B\rho) = -1.4969 \text{ m}^{-2}$$

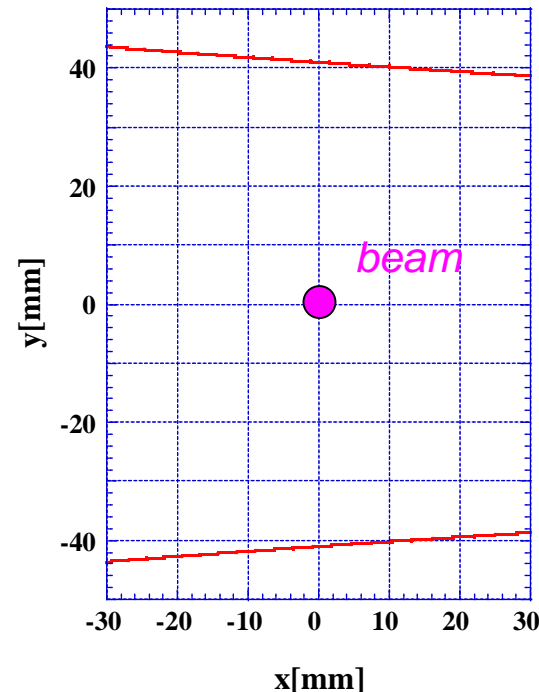
$$r_0 = 1.3369 \text{ m}$$

$$n = -2.6754$$

$$y_0 = 41.0 \text{ mm} \text{ を仮定 (あいちSRの超伝導BMと同じ)}$$

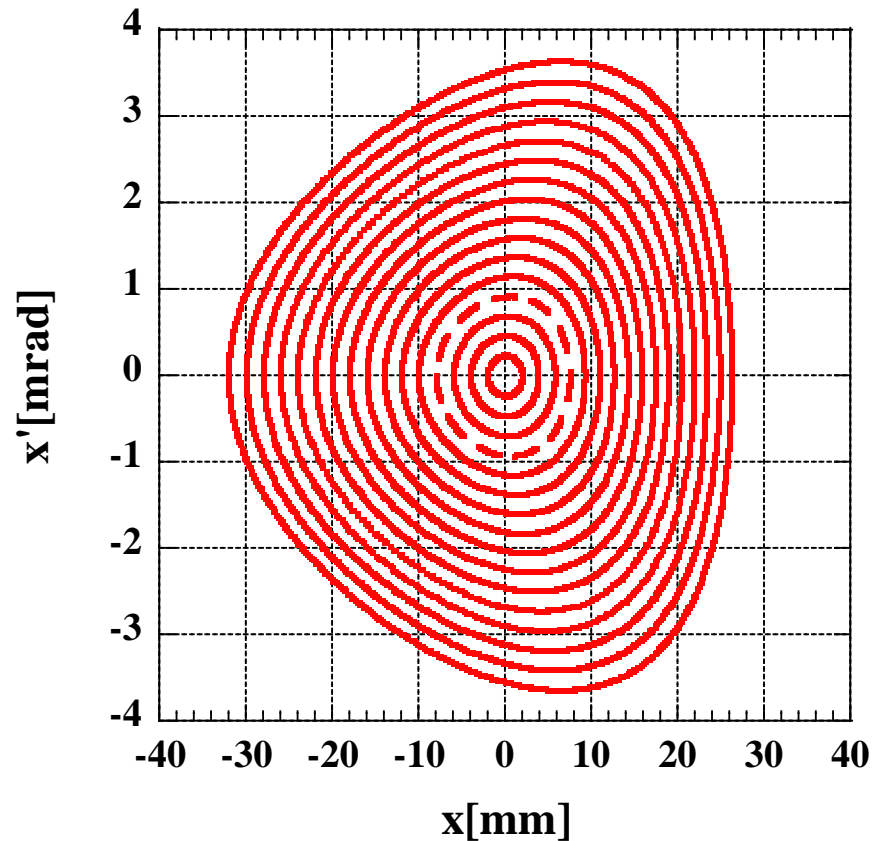
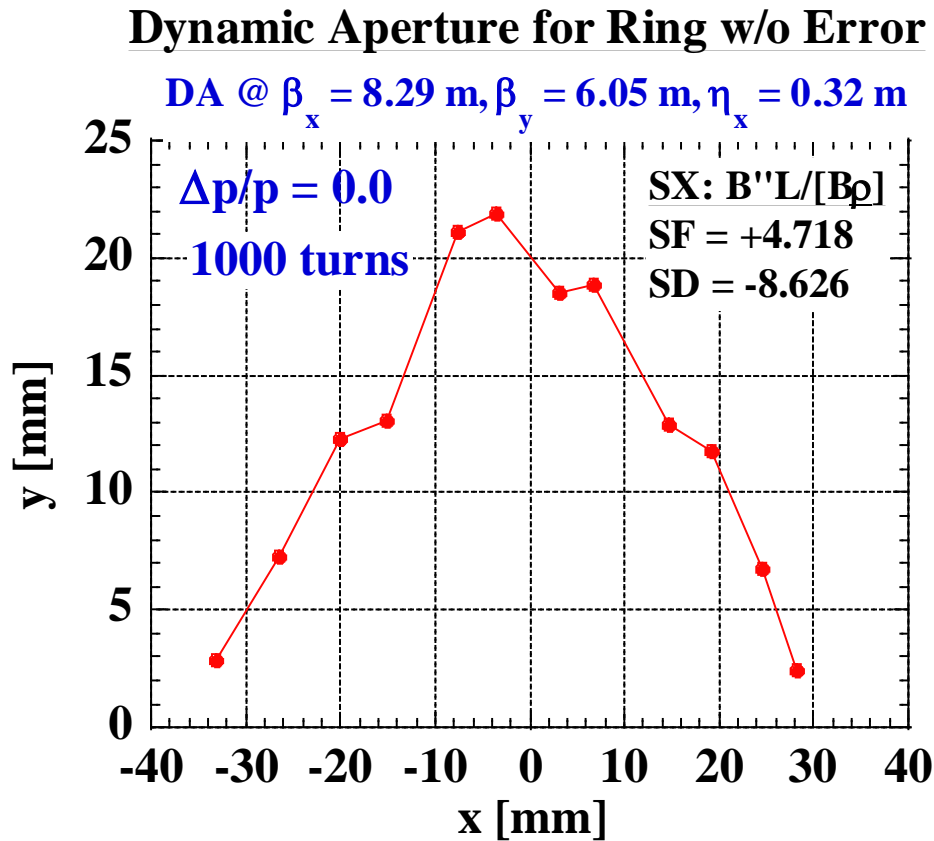
$$\left(\frac{r_0}{n} - x\right)y = \frac{r_0 y_0}{n}$$

$$n = -\left(\frac{r_0}{B_0}\right) \frac{dB_y}{dx}$$



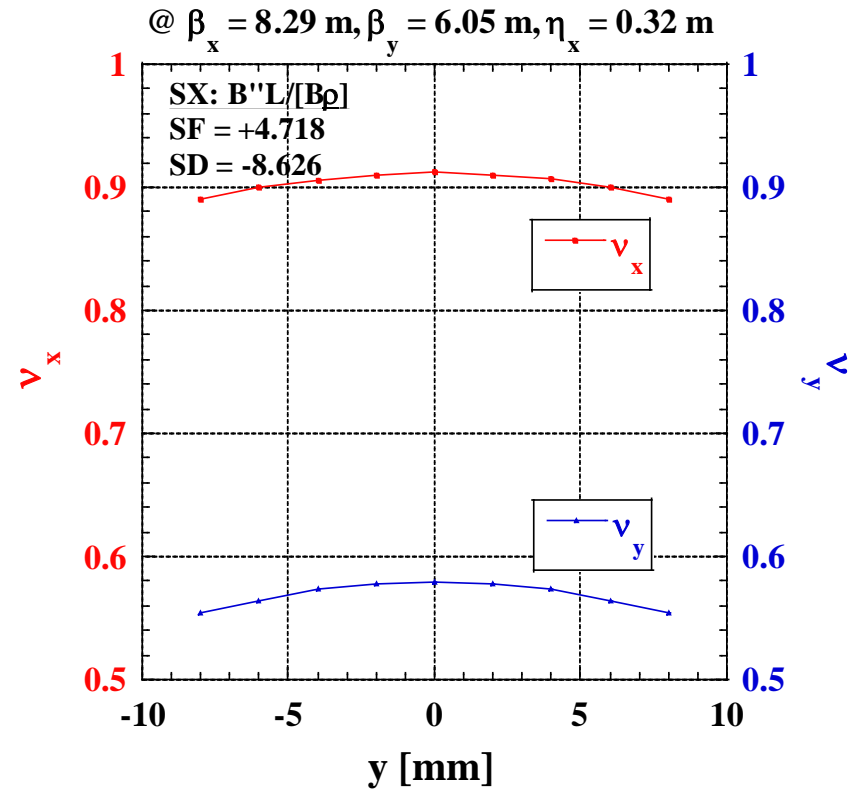
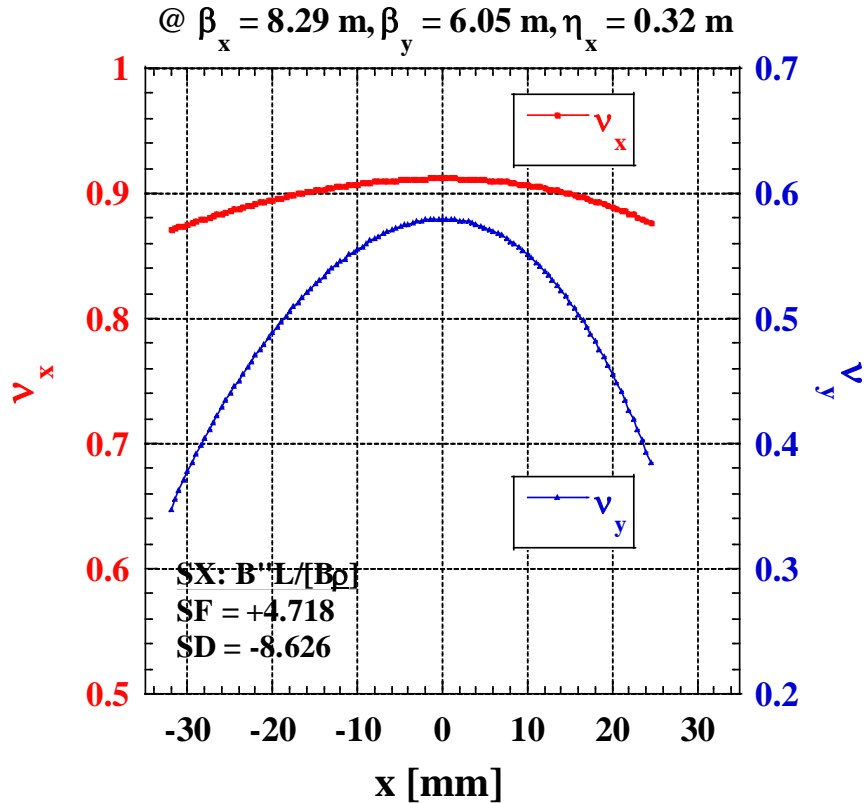
ダイナミックアパーチャー

エラー無しリングのダイナミックアパーチャーを計算(入射直線部中心)
右側の図は、 $y=0$ として計算した水平方向位相空間(ポアンカレマップ)。



振幅依存チューンシフト

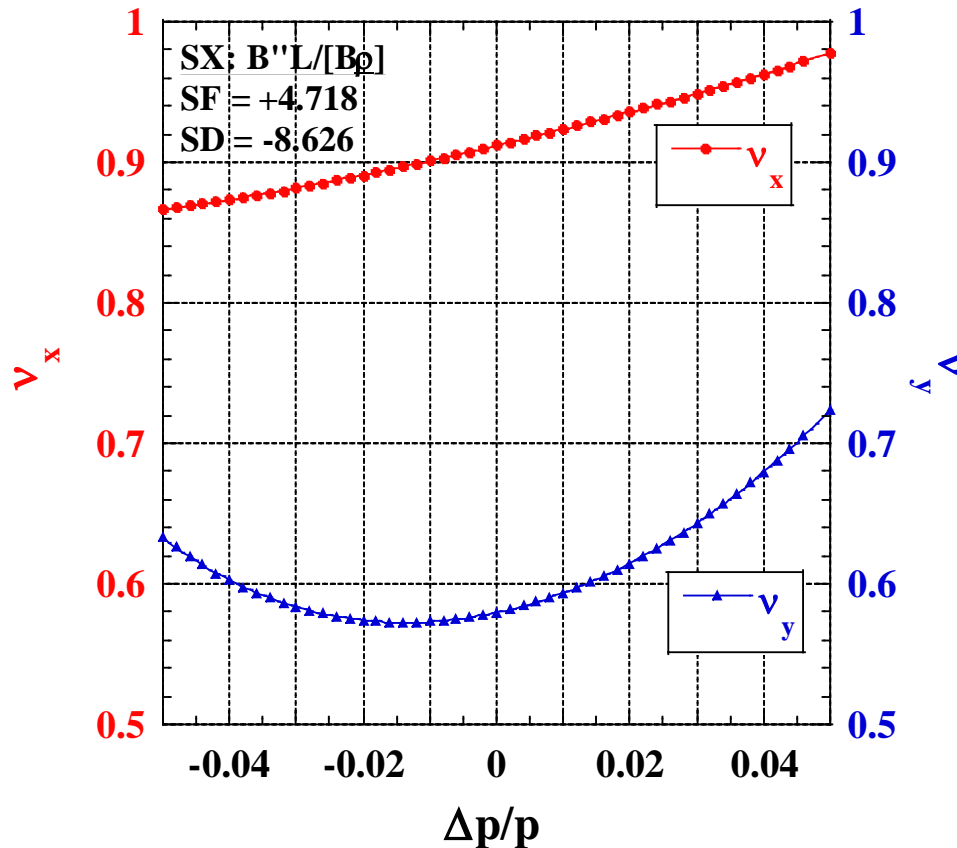
エラー無しリングでの、ベータatronチューンの振幅依存性を下図に示す。



クロマティシティ

エラー無しリングでの、ベータatronチューンのエネルギー依存性、すなわち(非線形)クロマティシティを計算した結果を下図に示す

チューンの設定値を妥当な値にすれば、エラーを考慮しても $\pm 5\%$ 程度の Momentum Acceptance は期待できると思われる。ただし、セル数を増やすほど、クロマティシティの2次の項が大きくなり(特に垂直方向)、不利な方向に動く



ビーム寿命の見積り

(1) Touschek ビーム寿命と量子ビーム寿命 (IBS効果は考慮していない)

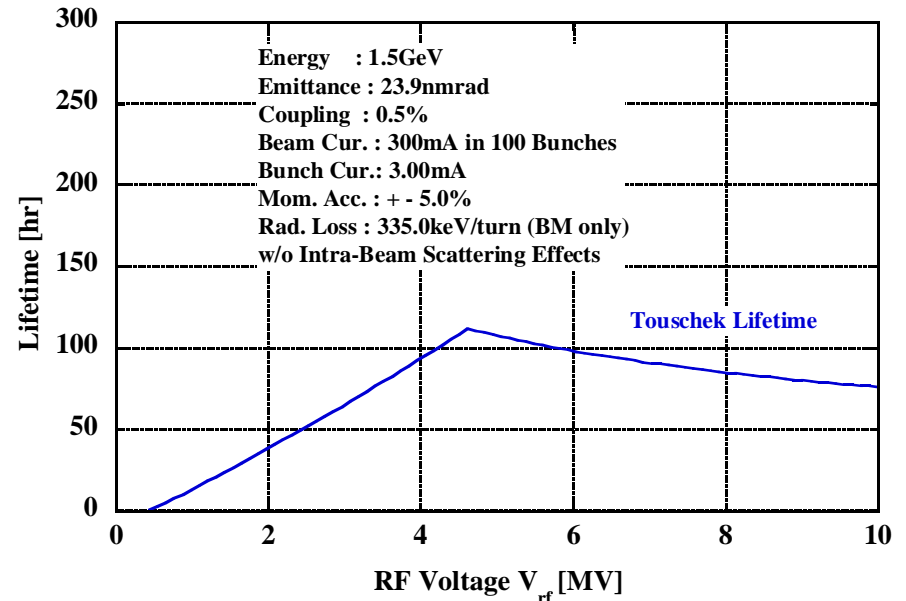
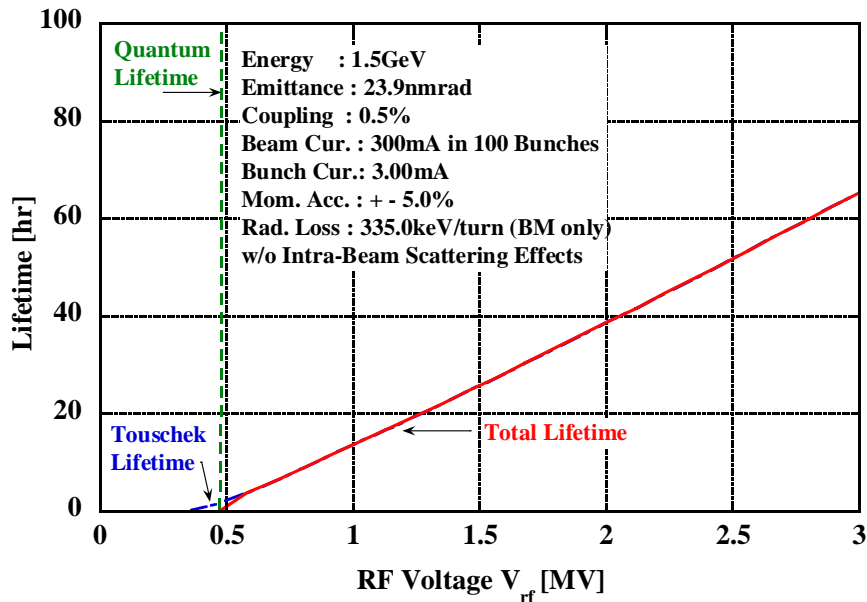
$$\frac{1}{\tau_{Touschek}} = \left\langle \frac{Nr_0^2 c}{8\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_s} \frac{1}{\gamma^2} \frac{1}{\delta_m^3} D(\xi) \right\rangle$$

$$\tau_{quantum} = \frac{1}{2} \tau_s \frac{e^X}{X} \quad X \equiv \frac{\left(\frac{\Delta E_{max}}{E}\right)^2}{2\sigma_\delta^2}$$

仮定したパラメータ

蓄積電流 : 300 mA、Full-Filling、バンチ電流=300 mA/(Harmonic Number)
x-yカップリング : 0.5 %、Momentum Acceptance : ±5 %

- ・ δ_m は momentum acceptance で、場所によらず一定とした
- ・ バンチ長は zero-current limit の値を用いた
- ・ Intra-Beam Scattering の効果は無視



(2) ガス散乱寿命

Möller散乱

$$\frac{1}{\tau_M} = cN \sum_i Z_i \sigma_M$$

$$\sigma_M = \text{Max} \left\{ \frac{2\pi r_e^2}{\gamma} \frac{1}{\left(\frac{\Delta \lambda}{P}\right)_c}, \frac{4\pi r_e^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_c^2} \right\}$$

Rutherford散乱

$$\frac{1}{\tau_R} = cN \sum_i \sigma_R$$

$$\sigma_R = \frac{4\pi Z_i^2 r_e^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_c^2}$$

制動放射

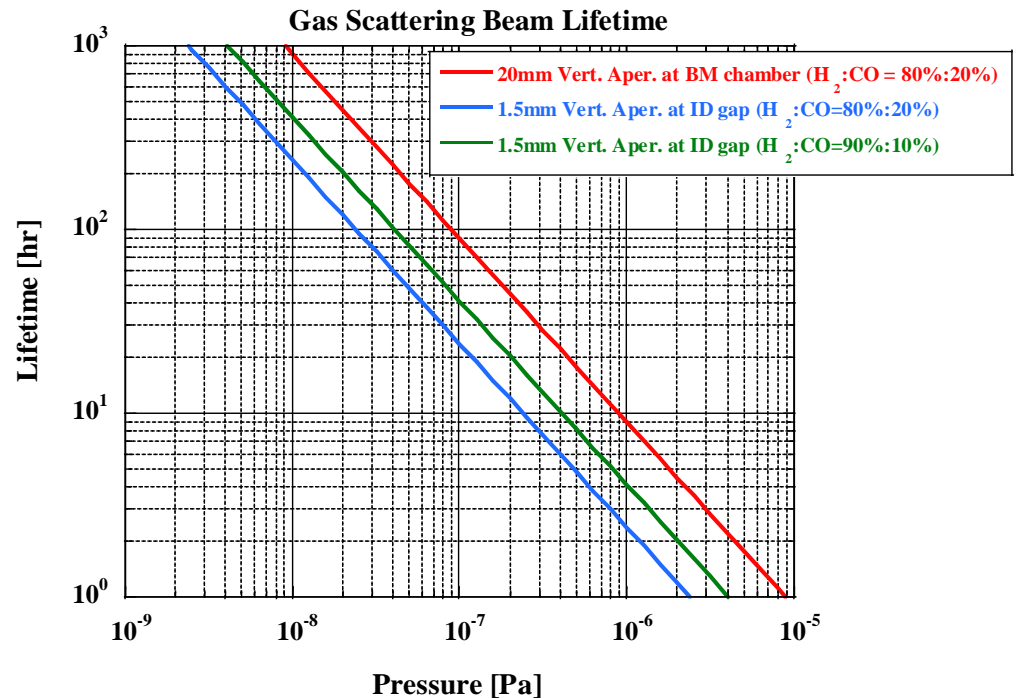
$$\frac{1}{\tau_B} = cN \sum_i \sigma_B$$

$$\sigma_B = 4\alpha r_e^2 Z_i (Z_i + 1) \left\{ \frac{4}{3} \ln \frac{1}{\left(\frac{\Delta \lambda}{P}\right)_c} - \frac{5}{6} \right\} \ln \left[183 \cdot Z_i^{-1/3} \right]$$

$$\frac{1}{\tau_G} = \frac{1}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_B}$$

H₂ : CO = 80 % : 20 % を仮定

Rutherford散乱の寄与が大きい



(赤線) IDギャップ開の場合: β_y=23.5 mのBMチェンバ
(垂直アパーチャー: ±10 mm)
(青線) IDギャップ1.5 mmの場合: ID端部のβ_y=0.747 m
(緑線) IDギャップ1.5 mm (H₂ : CO = 90% : 10%)



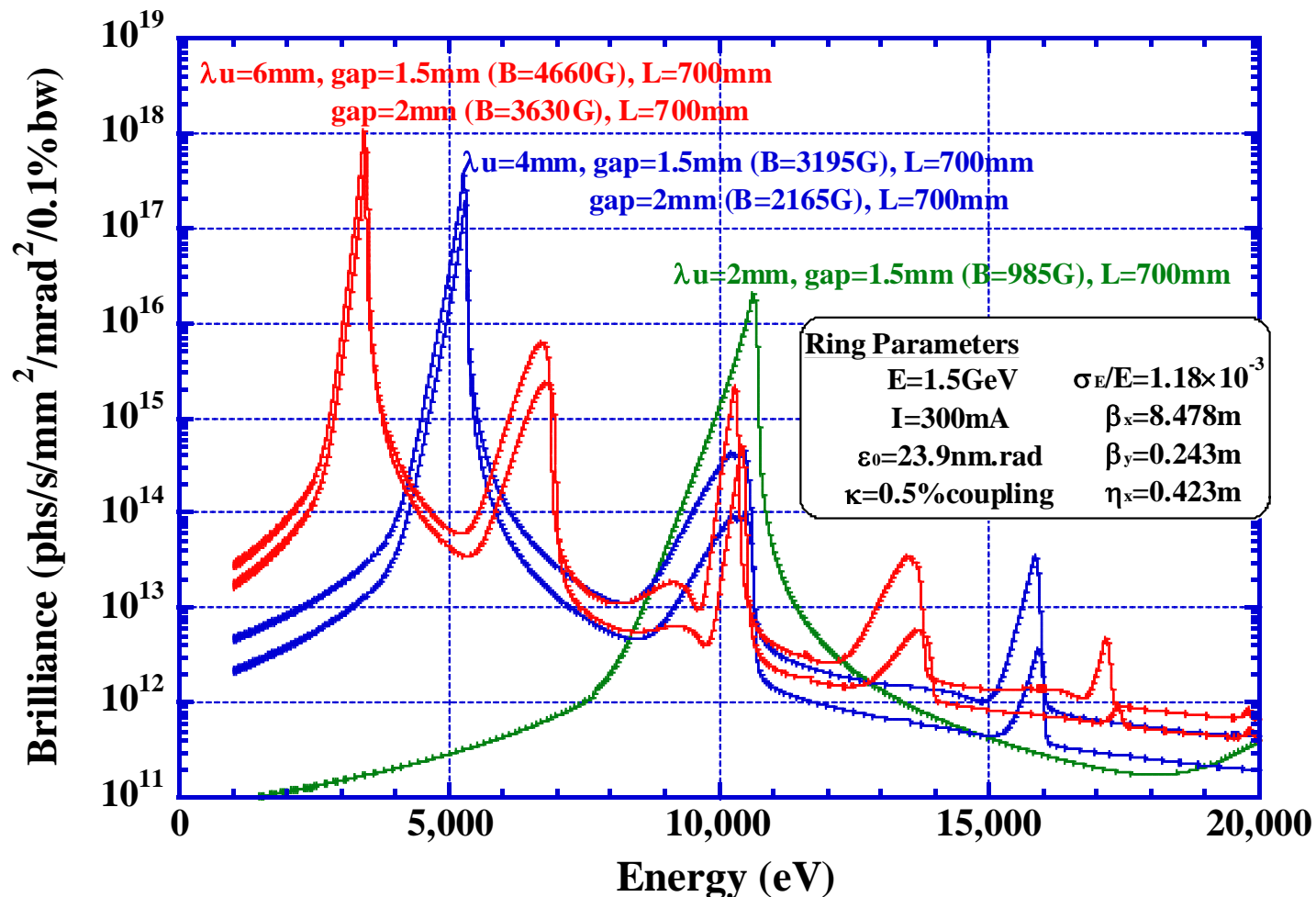
1 × 10⁻⁷ Pa以下でガス散乱寿命は20時間以上

・Touschekと合わせて、30時間程度の寿命は確保でき
そうである

cf. IDギャップ1.5mmは、BMチェンバ ±4.2 mmと等価

アンジュレータ スペクトル

Brilliance of Very Short Period Undulators on the Model Storage Ring



周期長6mm : gap=1.5mm(B=4660G), gap=2mm(B=3630G)
周期長4mm : gap=1.5mm(B=3195G), gap=2mm(B=2165G)
周期長2mm : gap=1.5mm(B=985G)

まとめ

- (1) 開発を進めてきた狭ギャップ極短周期アンジュレータが蓄積リング光源として十分な性能を持っていること、そして蓄積リングと共存できる事を示す事が出来た
- (2) $L=0.7$ の極短周期アンジュレータ12台が設置できる周長60mの蓄積リングのラティス設計を行った
- (3) エミッタンスは35.7 nm.radを得る事が出来た
- (4) ダイナミックアパーチャーは十分である
- (5) ビーム寿命の評価を行い、ギャップ1.5 mmでも問題がないことを確認した
- (6) アンジュレータスペクトルは期待通りであると考えている
- (7) チューンの調整が必要。垂直チューンは少し上げた方が良く考えている。振幅依存チューンの動き(v_y vs. ξ)から、 ξ が増えていくと v_y が半整数を横切ってしまう。今のままでは、エラーを入れた時にダイナミックアパーチャーが縮むと考えられる

今後の展望

- ・直線部の長さやID長および最小ギャップの最適化
- ・IBS 効果の影響評価を行う
- ・狭ギャップIDが入った場合のビームロスの詳細な評価。どこでロスさせるか
- ・詳細な検討が不足している箇所があるので、更に検討と最適化を進める

謝辞

- ・ラティスの計算は高輝度光科学研究センターの早乙女氏が行った
- ・本研究はJSPS 科研費 26246044 の助成を受けたものである