

# 短直線部のある HMBA型3GeV放射光源の設計

KEK-LSの基本設計

# 蓄積リング型光源の発展

---

1980年代：第2世代（SRS、PF……）

- エミッタンス100nmrad～数十nmrad、**最高輝度 $\sim 10^{18}$** 。
- **FODO**ラティス、偏向電磁石主体。

1990年代：第3世代（ALS、DIAMOND……）

- エミッタンス10nmrad～数nmrad。
- **DBA、TBA**ラティスの導入。
- 色消し直線部の挿入光源で高輝度光発生。

2000年代：新第3世代（SLS……）

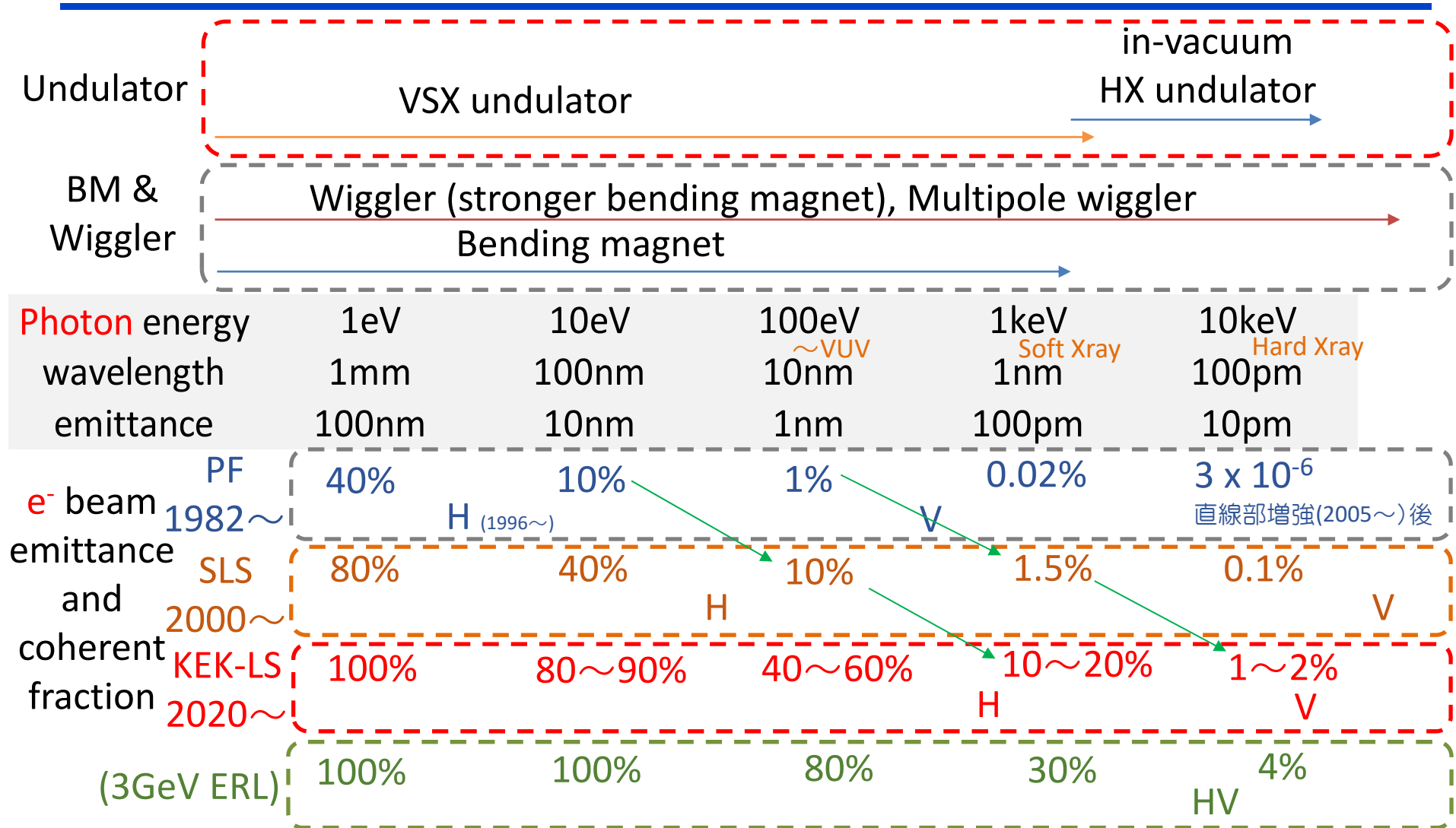
- エミッタンス数nmrad、**最高輝度 $\sim 10^{20}$** 。
- 真空封止短周期挿入光源で3GeVクラスで10keV利用。
- トップアップ入射の一般化。
- 加速器要素全てに気を遣い、ビーム安定化の向上。

2010年代：第4世代光源（MAX IV、ESRF II、Sirius……）

- エミッタンス数百pmrad、**最高輝度 $\sim 10^{22}$** 。
- **MBA、HMBA**（→ **DTBA、DQBA**）型ラティスの導入。

→ この改良型をデザイン目標とする。

# 光と電子のエミッタンスの変遷



5m insertion device,  $\beta_x=\beta_y=5m$ ,  $\alpha_x=\alpha_y=0$ ,  $\eta=0$ ,  
 $(\epsilon_x, \epsilon_y)=PF(36nmrad, 0.7nmrad)$ ,  $SLS(5nmrad, 3pmrad)$ ,  $KEK-LS(150\sim300pmrad, 8pmrad)$ ,  $ERL(17pmrad, 17pmrad)$

# 短直線部のあるHMBA光源の利点

## HMBA(Hybrid Multi-Bend Achromatic)型ラティスの特徴

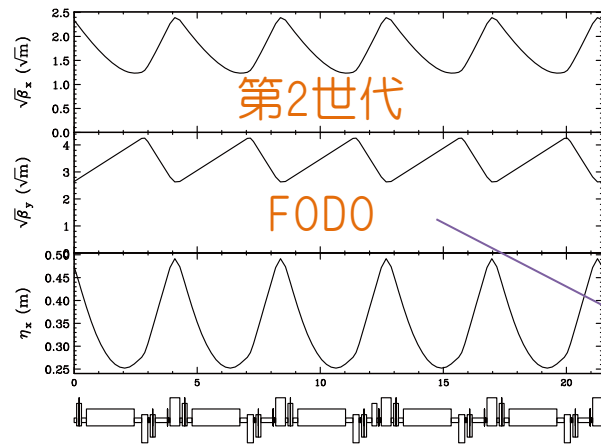
- もともとESRF upgrade計画で開発されたラティス。
- 極低エミッタンスと広いダイナミックアパーチャの両立。
- 第3世代のDBA(Double Bend Achromatic)と理論最小エミッタンスのMBA(Multi-Bend Achromatic)ラティスの長所の組み合わせ。
  - **DBAの長所**: ビーム進行方向に磁場勾配のある偏向電磁石を使って、エミッタンス増大を抑制しつつ分散関数の大きな部分(分散バンプ)を作り、そこに6極を設置することで、非線形力を抑制。
  - **MBAの長所**: 発散力を持つ偏向電磁石で分散関数を最適化、強く絞ることで極低エミッタンスを実現。
  - さらに6極間のチューンの進みを最適化し、セル内で非線形力を打ち消し。

## 真空封止短周期挿入光源の利点

- 真空封止挿入光源はPF-ARで開発され、直線部増強後はPFでもフル活用されている。
- 短直線部で高輝度、高光束の汎用ビームラインが可能になる。ビームライン数を2倍に増やすことができる。

HMBA型ラティスに短直線部を加えることで、汎用性と先端性を両立する、ビームライン数の多い極低エミッタンス蓄積リング型光源が可能となる。

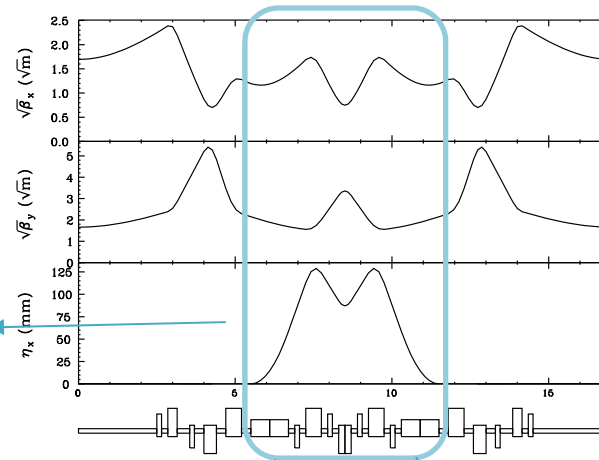
# HMBAからDQBAへ



第2世代

FODO

PF  
FODO  
+DBA

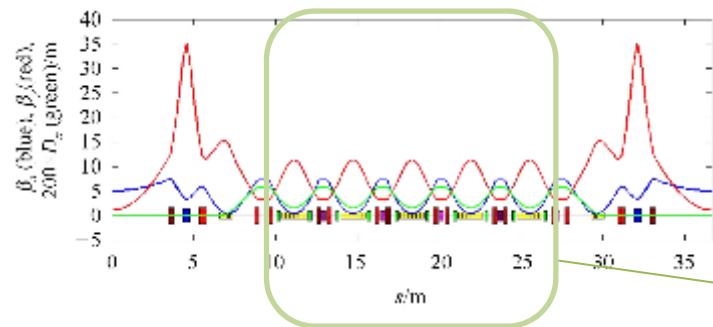


3rd generation  
DBA, TBA

Large h section,  
small Sextupoles

Large dynamic aperture

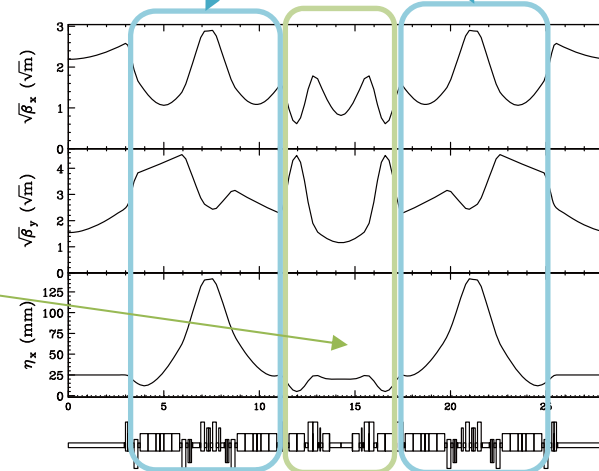
$\epsilon_x$ : 1~10 nrad



MBA

分散小さく、6極強い  
アパーチャが小さい

$\epsilon_x$ : 0.1~1 nrad



線形オプティクスの工夫で  
革新的性能向上!

HMBA

分散バンプで  
6極弱い

広いアパーチャ

$\epsilon_x$ : 0.1~1 nrad

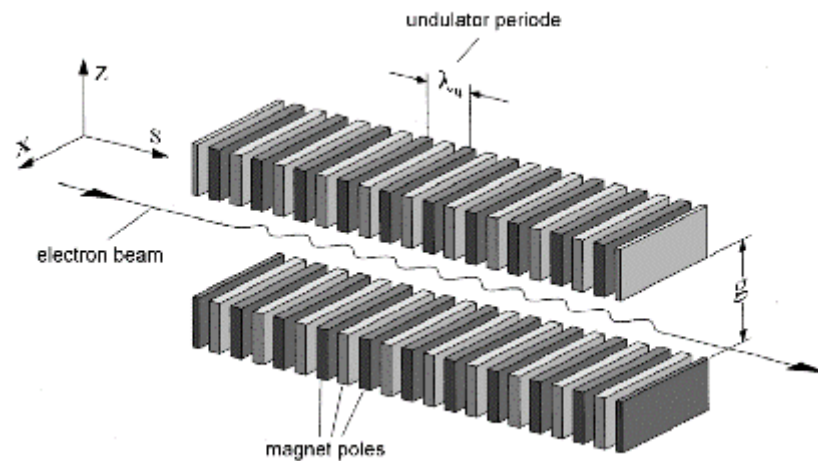
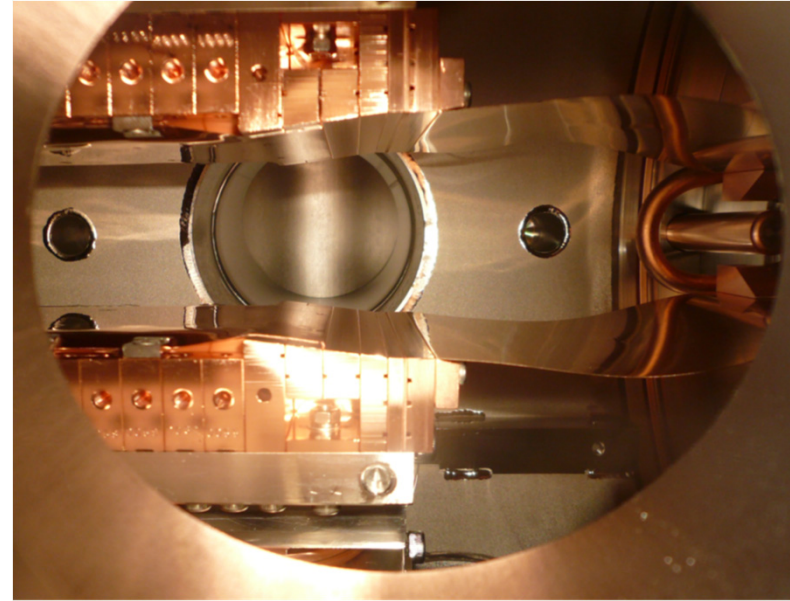
+

短直線部の追加

↓

DQBA

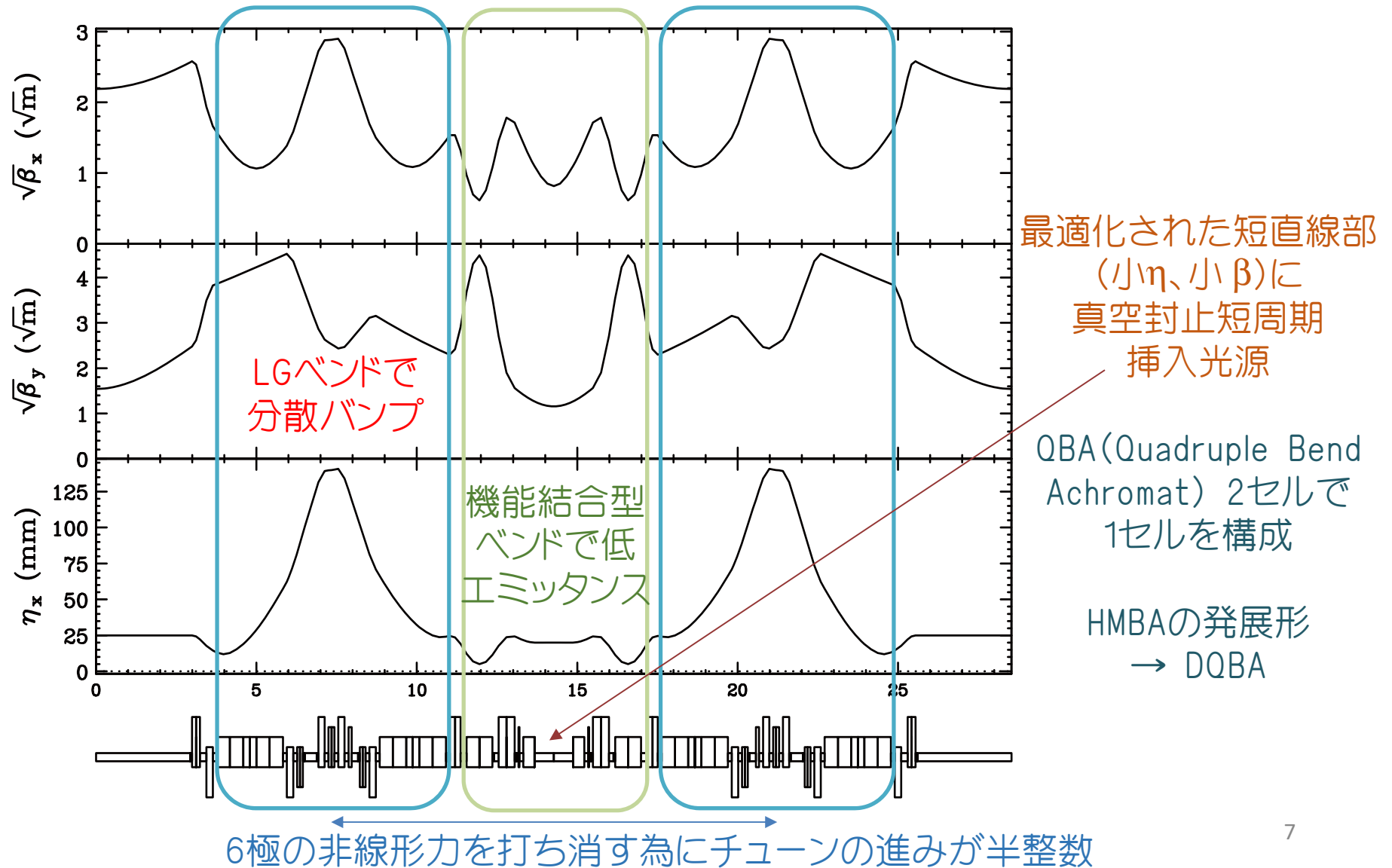
# 真空封止短周期挿入光源の活用



- 3 GeVで10 keV発生させるには、およそ  $\lambda_u \sim 2$  cm、 $g \sim 4$  mmが必要。
- 真空封止短周期挿入光源でそれが可能になった。
- PFでは直線部増強後に導入され、最大限活用されている。(ただし、PFではDBAの分散バンプに設置しているので条件は悪い。)

# HMBAからDQBAへ

DQBA = ESRF型HMBA + 最適化された短直線部



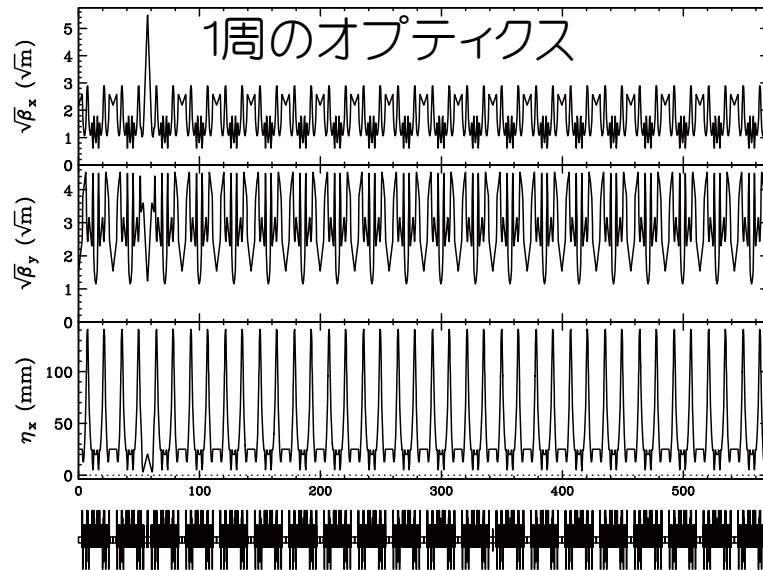
# DQBAラティスの基本パラメータ

エネルギー	E [GeV]	3	
ラティスタイプ	-	短直線部のあるHMBA (DQBA)	
周長	C [m]	570.7	
1.2m直線部の数	#	20	
5.6m直線部の数	#	20 (Including injection and RF)	
セル数	#	20	
RF周波数	f <sub>RF</sub> [MHz]	500.1	
ハーモニク数	h	952	
RF電圧	V <sub>RF</sub> [MV]	2.0	
バケットハイト	%	4.0	
エネルギー損失	MeV/rev	0.30	
モーメントムコンパクション	$\alpha$	2.2x10 <sup>-4</sup>	
ベータatron振動数	v <sub>x</sub> ,v <sub>y</sub>	48.58, 17.62	
減衰時間 (x,y,z)	[ms]	29.25, 38.28, 22.63	
蓄積電流値	[mA]	0 (natural)	500 (with IBS)
水平エミッタンス	[pm-rad]	132.5	314.7
カップリング	[%]	2.6	
垂直エミッタンス	[pm-rad]	8.2	
タウシエック寿命	[h]	-	
エネルギー拡がり	x10 <sup>-4</sup>	6.4	7.9
バンチ長	mm	2.7	3.3
パルス幅	ps	9.1	11.1

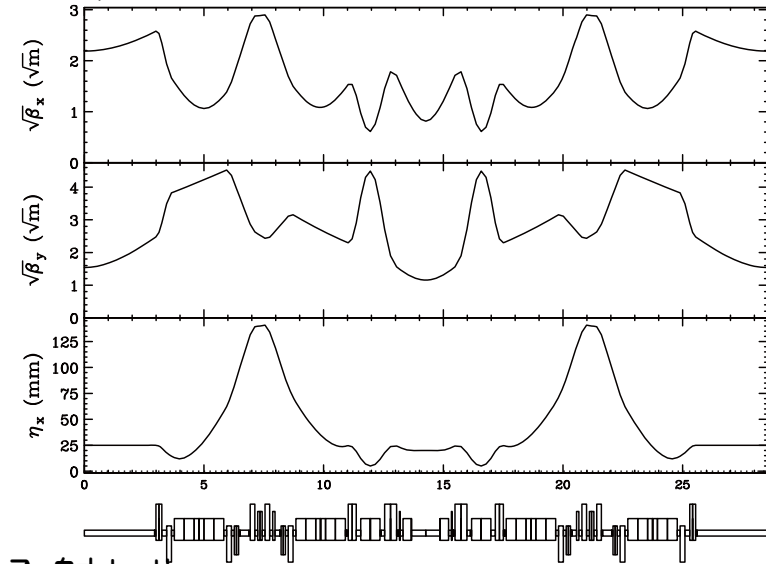
38本の挿入光源BL + 20本の偏向電磁石BLが同時利用可能。 8



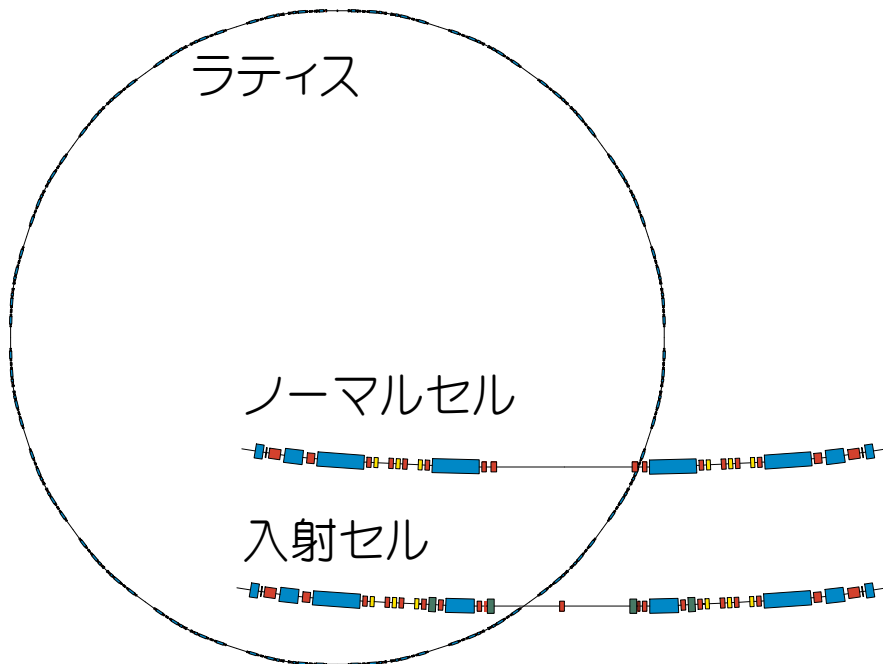
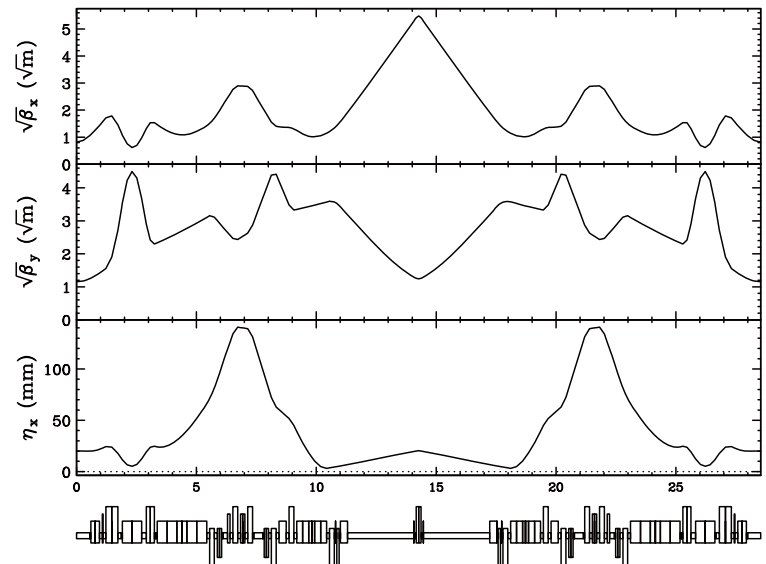
# ラティスとオプティクス



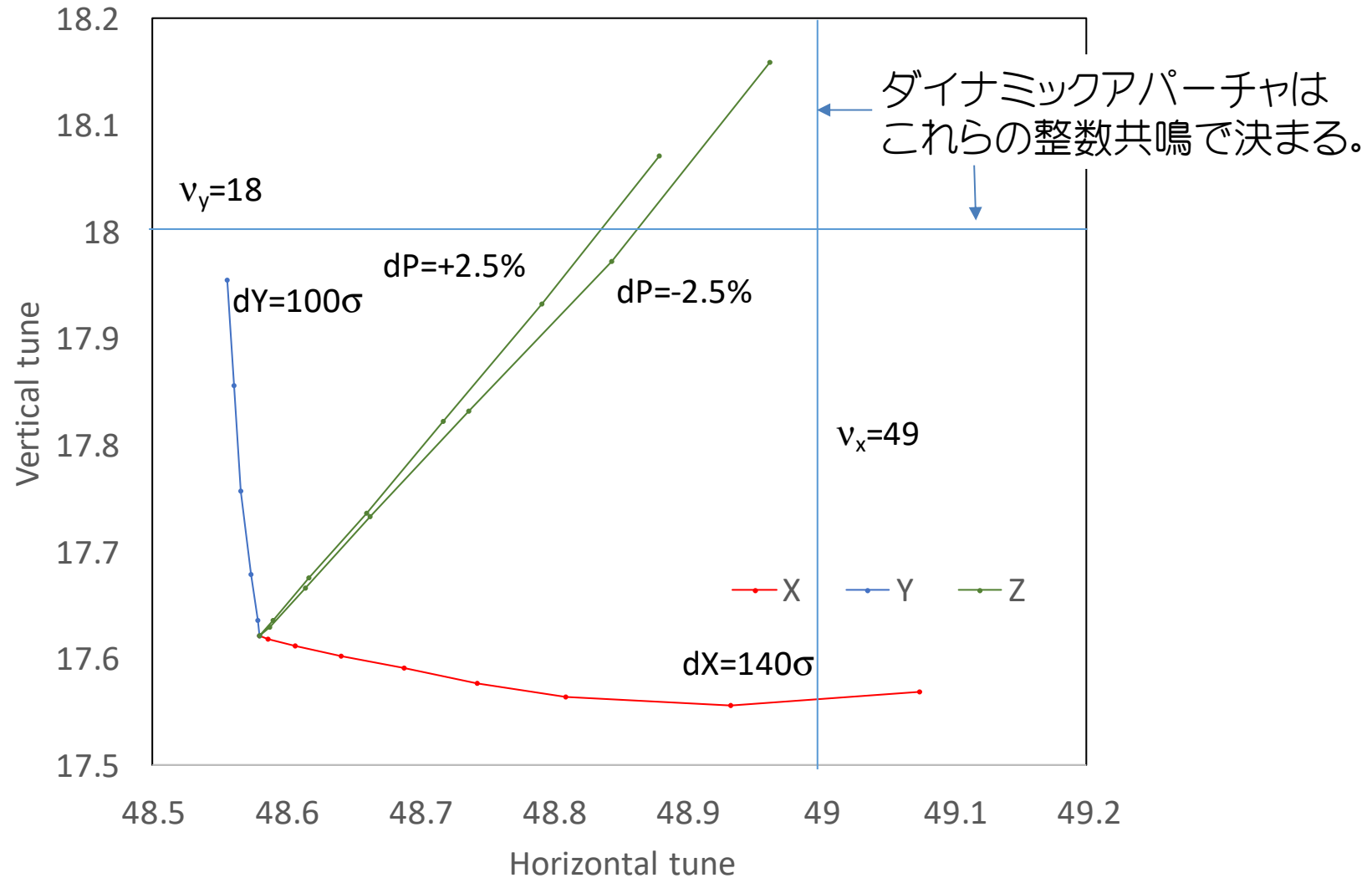
ノーマルセル



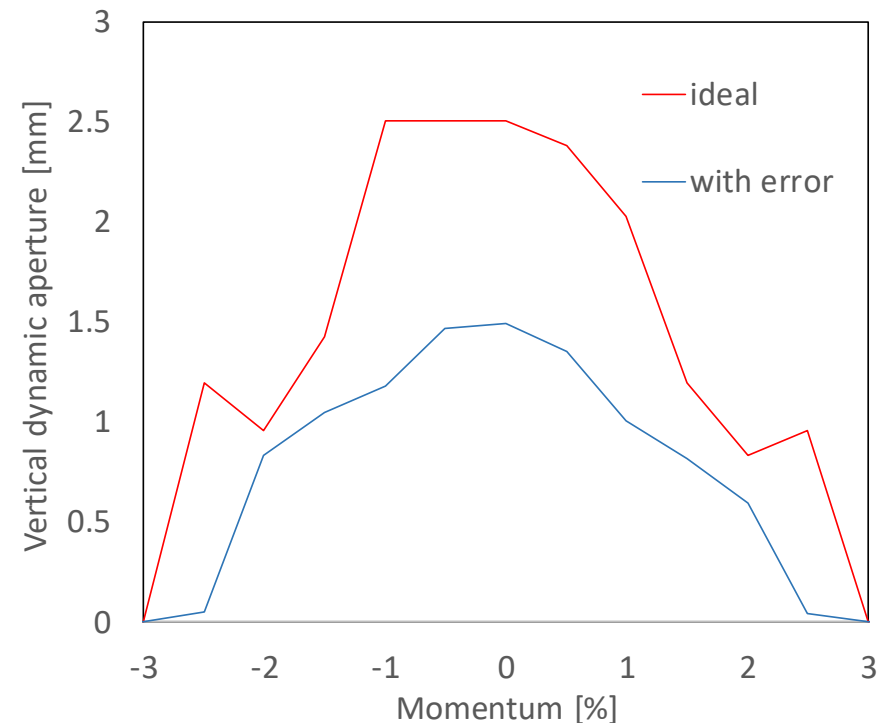
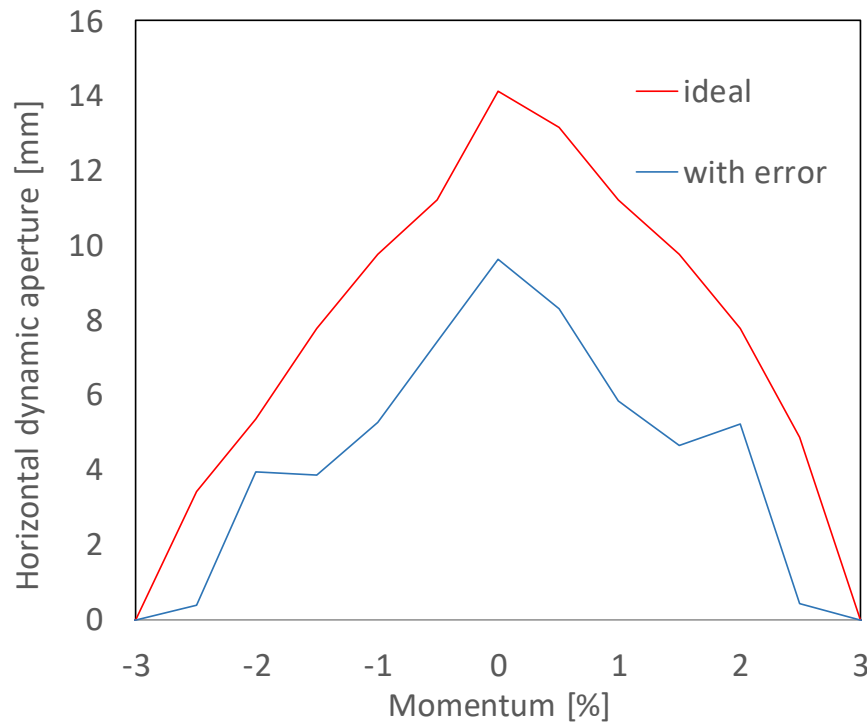
入射セル



# チューンシフトとアパーチャ

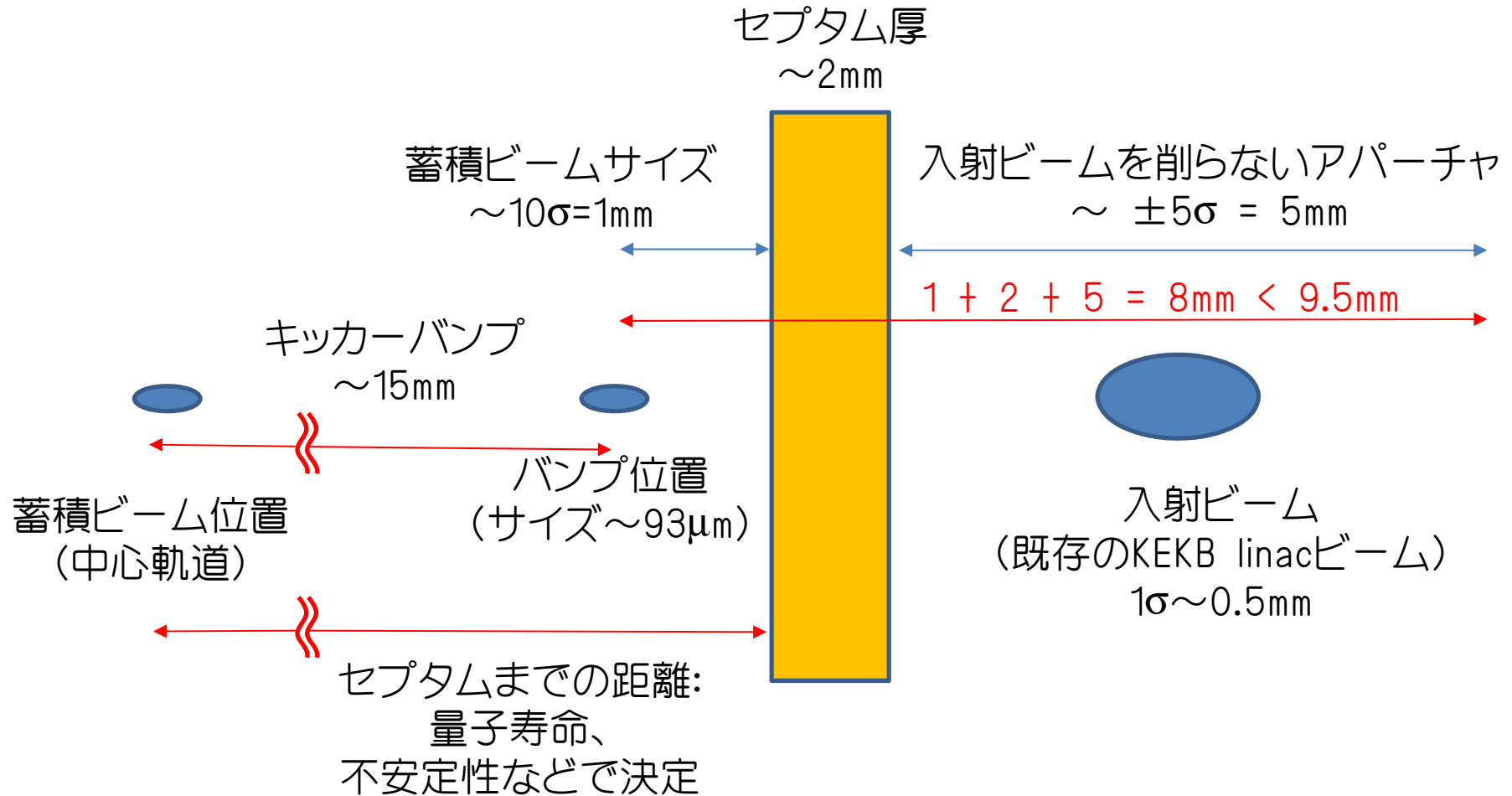


# 誤差入りのダイナミックアパーチャ



- 仮定した磁場誤差はガウス分布で $1\sigma$ が据付誤差 $50\mu\text{m}$ 、磁場強さの誤差0.05%、回転誤差0.1mradである。
- 入射点のパラメータは  $\beta_x=28\text{m}$ 、 $\beta_y=1.7\text{m}$ 、水平ビームサイズ $94\mu\text{m}$ 、垂直 $3.7\mu\text{m}$ であり、入射点の実寸のダイナミックアパーチャは誤差ありで約1cmとなる。
- 従来のキッカーセプトラムを使う入射に問題はない。

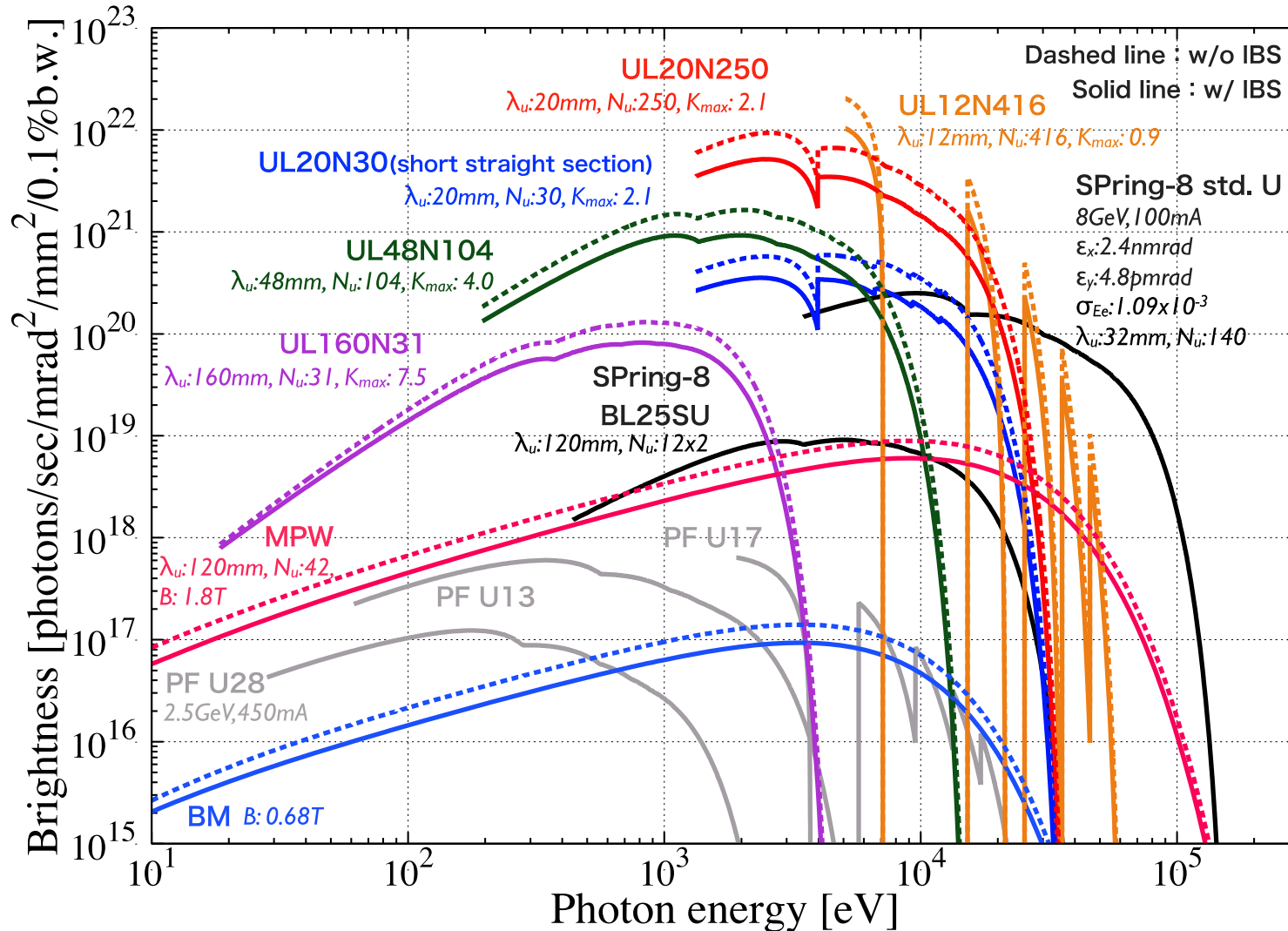
# 入射点の概念図



誤差入りのダイナミックアパーチャ(約1cm)で  
通常のキッカーセプタム入射に問題はない。

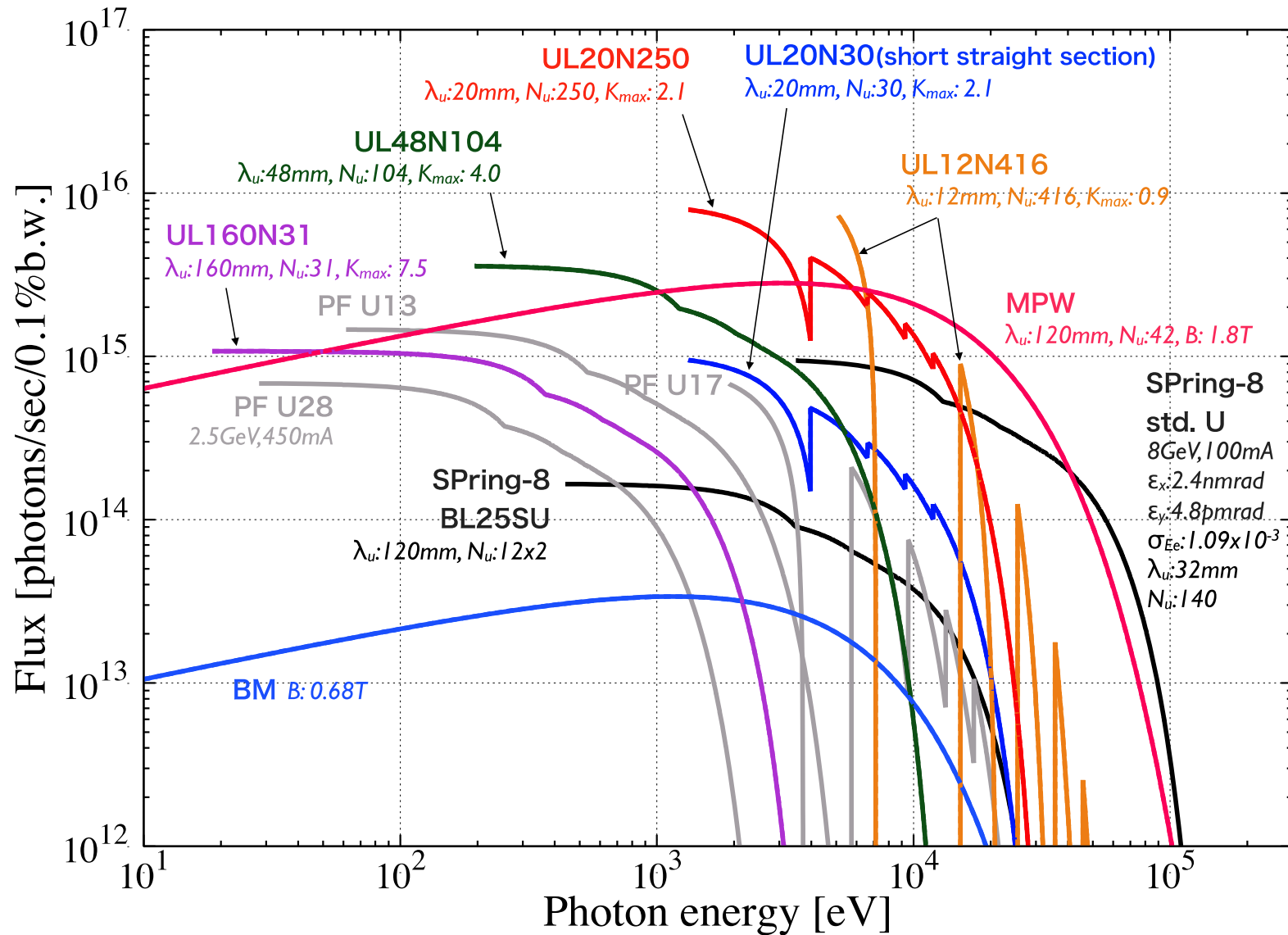
# 輝度

IBSなしのエミッタンスは133pmrad、ありで315pmrad。

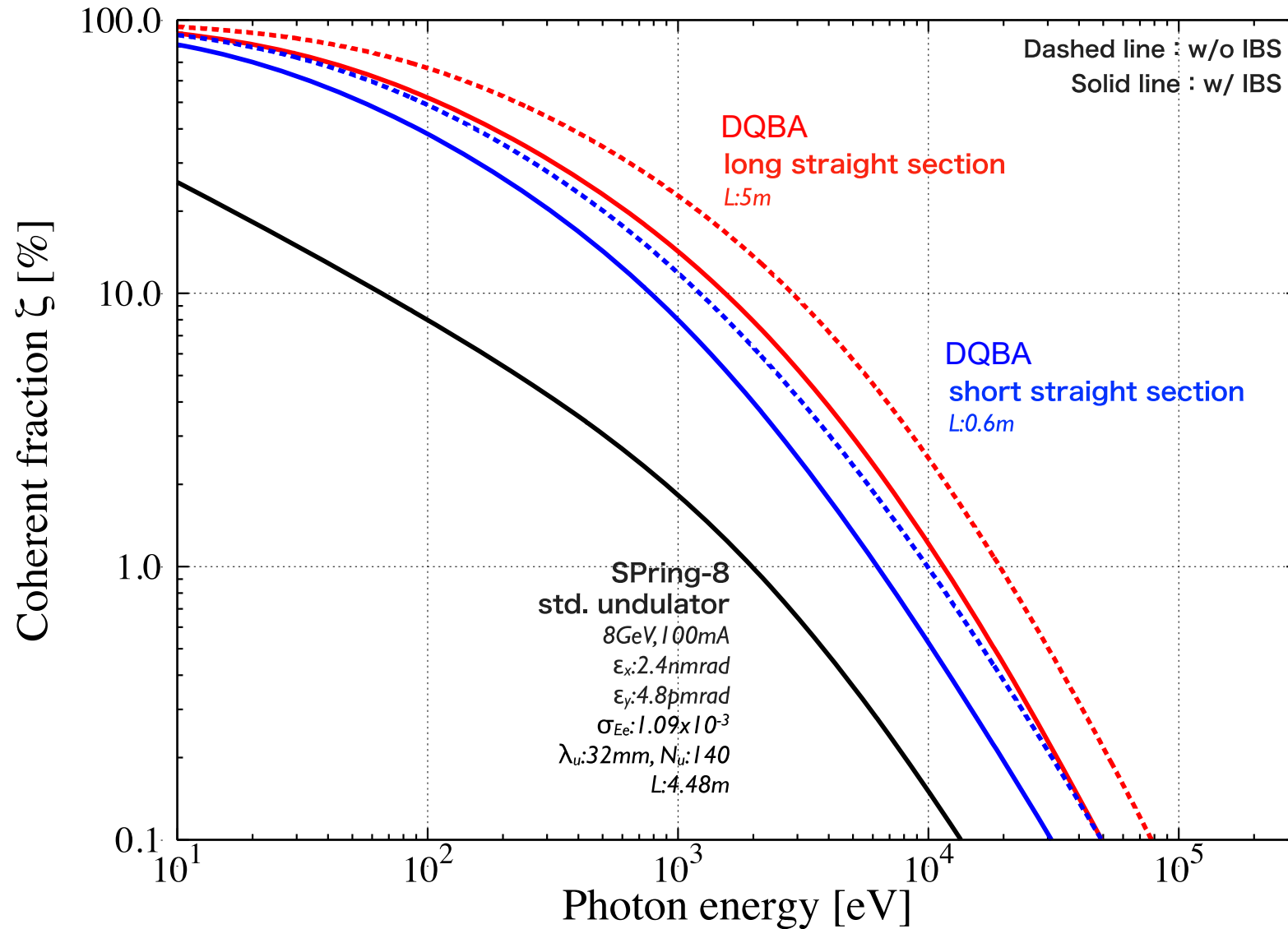


$\epsilon_{eff} = \sqrt{(\beta\epsilon + (\eta\sigma_E)^2)(\gamma\epsilon + (\eta'\sigma_E)^2)} / \beta\gamma$  IBSなしの実効エミッタンスは、5m部で160pmrad、1m部で225pmrad。

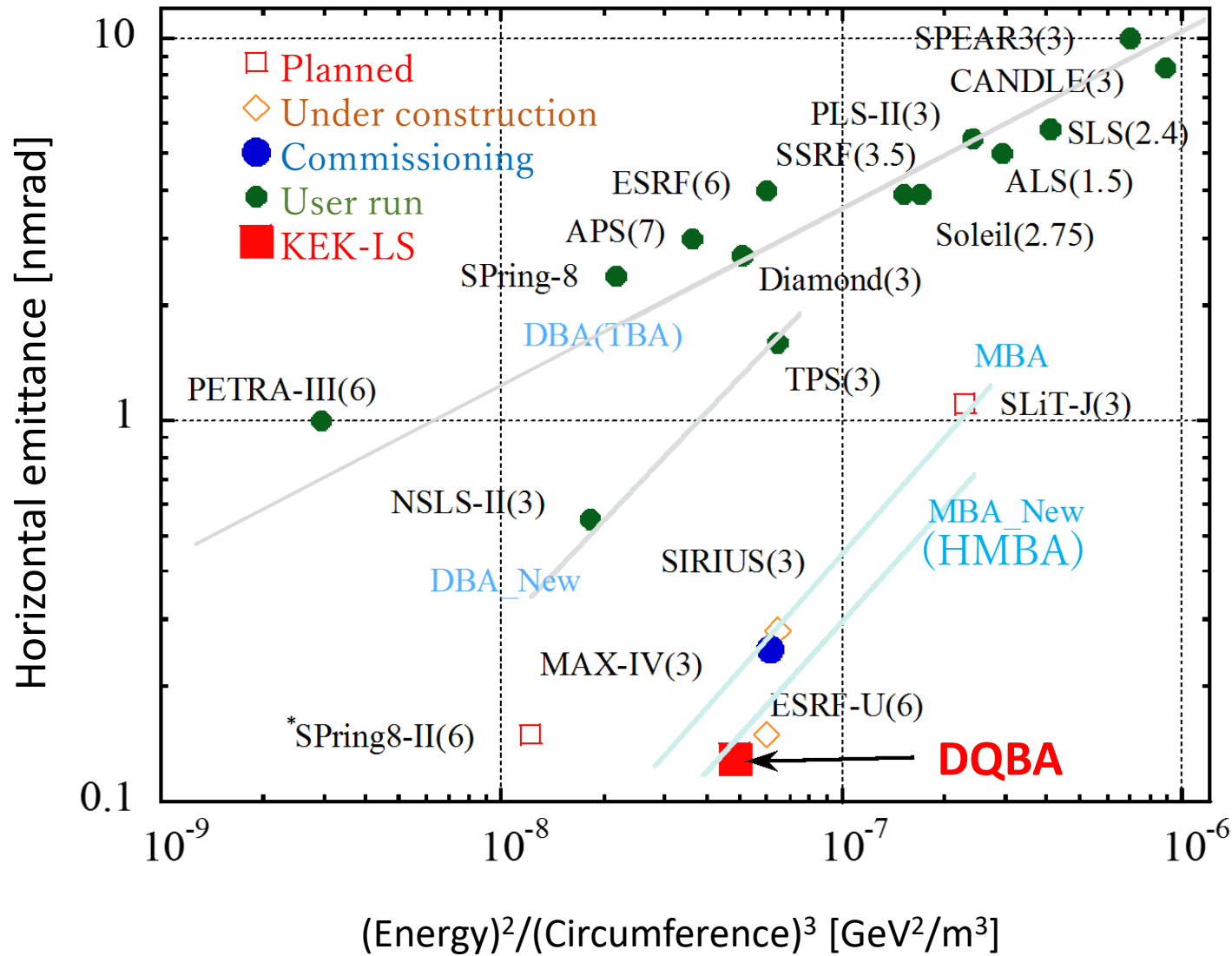
# 光束



# コヒーレント比



# ラテイスタイプと周長・エミッタンス



\*Circumference of SPring8 includes four 30m long straight section with matching sections.

\*SLiT-J emittance is 0.9nmrad now.

$$\varepsilon \propto \gamma^2 \theta_{bend}^3 \propto \gamma^2 / N_{bend}^3 \propto E^2 / C^3 \quad 16$$



# ビームラインの光束の計算例

## 1keV領域の典型的なビームライン

	Simple optics	Nano focusing	FZP focusing	PF BL-16A
Beamsize (H) x (V) [nm]	8,500 x 6,100	47 x 49	28 x 28	140 $\mu\text{m}$ x 12 $\mu\text{m}$
Divergence (H) x (V) [mrad]	0.33 x 0.31	13 x 12	49 x 49	1.1 x 0.33
Total flux [phs/s]	$3.0 \times 10^{12}$	$1.4 \times 10^{11}$	$2.0 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{12}$
Coherent flux [phs/s]	$2.0 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^{11}$	-	$4.9 \times 10^8$
Energy dispersion [meV]	50	45	50	150

## 10keV領域の典型的なビームライン

	High coherence	Nano focusing	Strong focusing	PF BL-15A1
Beamsize (H) x (V) [nm]	500 x 570	48 x 50	27 x 26	17 $\mu\text{m}$ x 9 $\mu\text{m}$
Divergence (H) x (V) [mrad]	0.12 x 0.10	2.0 x 1.1	2.1 x 3.4	1.6 x 0.26
Total flux [phs/s]	$1.2 \times 10^{12}$	$1.5 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^{12}$	$2.4 \times 10^{11}$
Coherent flux [phs/s]	$1.0 \times 10^{12}$	$8.6 \times 10^{11}$	$6.8 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^7$
Energy dispersion [meV]	1.3	1.3	1.3	3.5

# 必要な加速器技術

- **細い真空ダクト**: 低エミッタンスの為にMBA的部分の4極電磁石の磁場勾配は約50 T/mになる。ボア直径を3 cm程度まで狭くする必要があり、真空ダクトは内径約2.5 cmになる。細いダクトで十分な真空圧力を維持する為には、NEGとアンテチェンバーの併用が必要(検討中)。
- **不安定性の抑制**: PFに比べ、約半分の大きさの細いダクト、長い減衰時間と小さな周回周波数の為、不安定性の閾値が下がる。RF、真空共に不安定性抑制の為のインピーダンスの制御が重要。
- **3倍波空洞の導入**: IBS抑制、不安定性抑制の為にバンチ伸長が効果的。
- **軌道安定性**: 典型的なビームサイズは水平50  $\mu\text{m}$ 、垂直5  $\mu\text{m}$ 。局所的な高周波地盤振動を抑制し、増幅しない設計にすると共に、建屋内の振動源を排除することが必須。
- **新しいビームラインと測定器**: 桁違いの高輝度光になるので、パワーが集中する。光学系の熱負荷分散と歪み誤差抑制が重要。

いずれも既存技術の延長、高度化であり、ゼロからのR&Dはない。  
また、ほぼ全ての将来の加速器に共通して必要な項目といえる。  
これらの技術向上は非常に有益である。

# 今後の展開

---

- 2016年6月にKEK-LSとしてCDR加速器部分を公開。
- 2017年3月のMAC(Machine Advisory Committee)を経て、TDRをまとめるべく、詳細な検討を継続中。
- KEKでは、実施を前提とした取捨選択後の研究プランとして、PIP (Project Implementation Plan)を策定。“3GeVクラスの蓄積リング型高輝度光源施設の具体的計画を早急に策定し、関係機関と連携しながら、早期の実現を図る”ことを決定。実際に機構全体として行動開始。
  
- パラメータを上げるオプションは既にいくつかある。一長一短なので、将来的にどこかのタイミングで決断することになる。
- ともかくこの案をベースに、一通り最後まで詳細設計案を作ることを目標としている。(ベースがあれば微調や細部の改善は容易。)