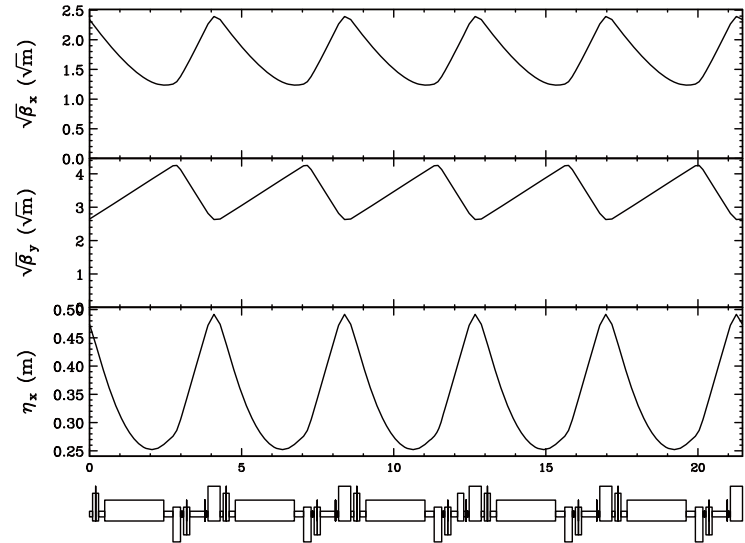


KEK 放射光計画ー蓄積リングー

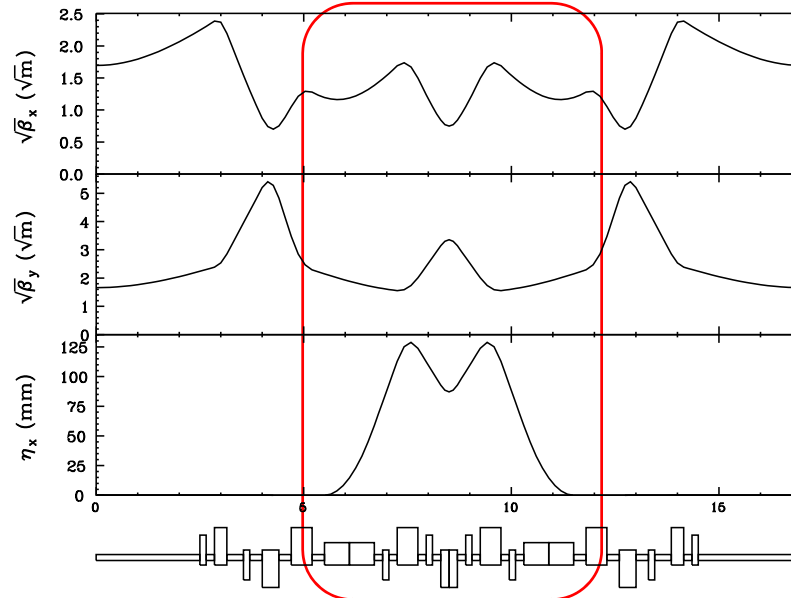
蓄積リング型光源の性能向上

- 将来光源として、今まで ERL を目指して開発を続けてきた。
 - ~20keV 程度までの光源を目指す。
 - 平均輝度 $21 \sim 22$ 乗、光束 $15 \sim 16$ 乗、多数のユーザーが同時に使え、高安定。
- ERL 計画提唱当時、SSR(Super Storage Ring)とか USRLS(Ultra Storage Ring Light Source)という極低エミッタンス蓄積リングの概念はあったが、非現実的なものばかりだった。
 - DBA、TBA で周長を巨大化しただけ、MBA-TME (理論最小エミッタンス) ラティスで 6 極が強すぎて全然回らない非現実的な案。
 - 通常の DBA、TBA で一部分だけ特殊技術で短パルスや極小丸ビームを実現する案などがあった。
- ところが、HMBA 型 (分散の大きな部分あり (6 極を小さくできる) の MBA ラティス) の登場で、MBA 極低エミッタンスラティスが、「回る、使えるラティス」になった！
 - 世界的に、2010 年頃から、蓄積リング型光源への回帰が見られる。
 - 中規模の HMBA ラティスの蓄積リング型光源は、短パルス特性を除き、ERL の目標を達成できる。
 - 加速器としての難易度、コスト、運転経費、想定される安定性など、蓄積リングの方が優れている。性能同等なら、蓄積リングにすべき。
 - cERL での技術、経験は、短パルス、フルコヒーレントの究極光源である、高繰り返しの X 線 FEL (CW-XFEL) にそのまま繋がり、生かすことができる。
 - 蓄積リング & XFEL で役割分担が可能になり、ERL 1 台ですべてを賄う必要はなくなった。
- 目標性能は同じだが、よりよい加速器を採用することにしたい。

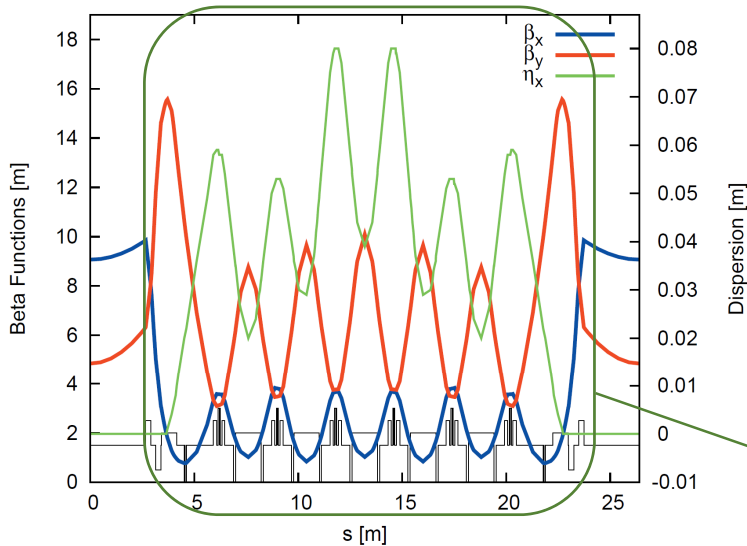
HMBA とは？



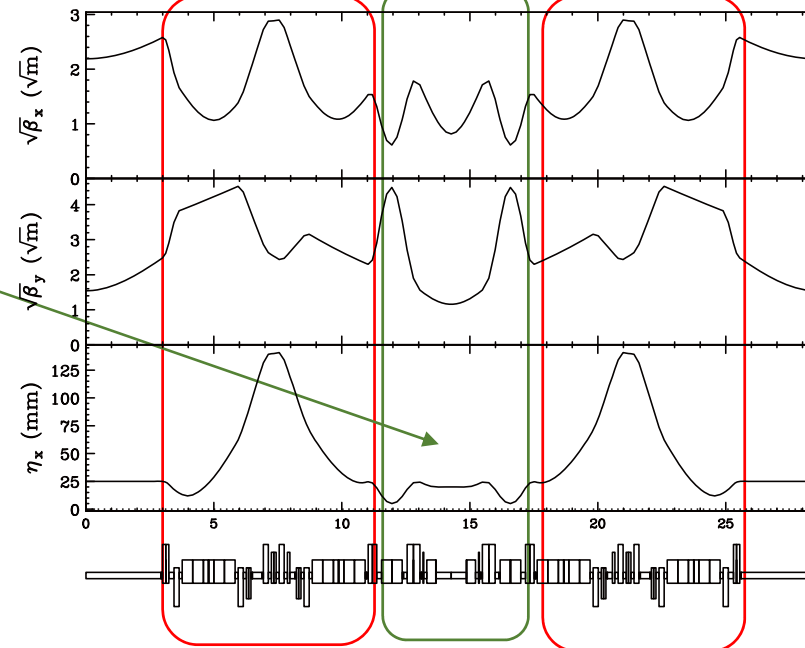
第2世代：FODOセル



第3世代、新第3世代：
DBA, TBA
分散大きく、6極小さい
アパーチャが広い
(直線部色消し)
 ϵ_x : 1~10nmrad



MBA 分散小さい、6極大きい
「回らない」ラティス
 ϵ_x : 0.1~1nmrad

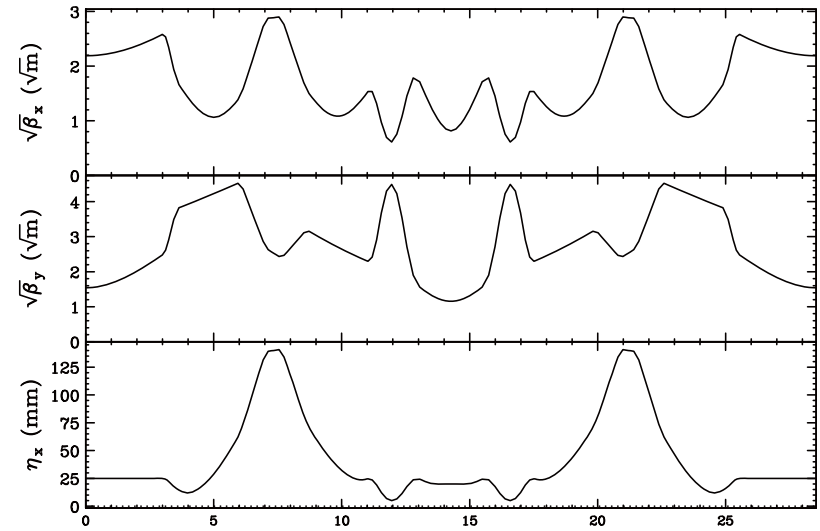
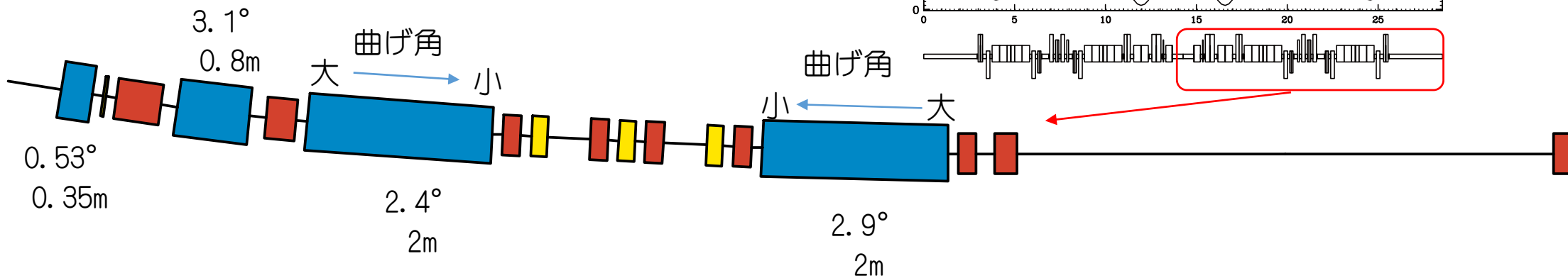


HMBA
分散バンプで6極小さい
アパーチャ広い
 ϵ_x : 0.1~1nmrad

DBA, TBA の様に、いろいろな施設
が採用する次世代放射光の標準的
なラティス構造になりつつある。

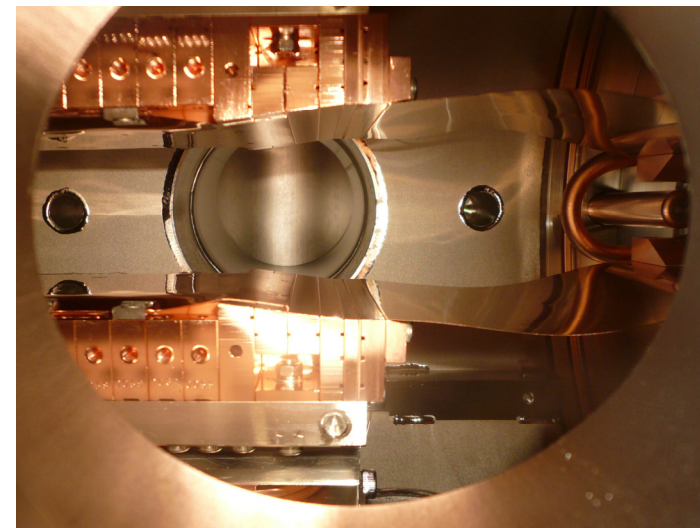
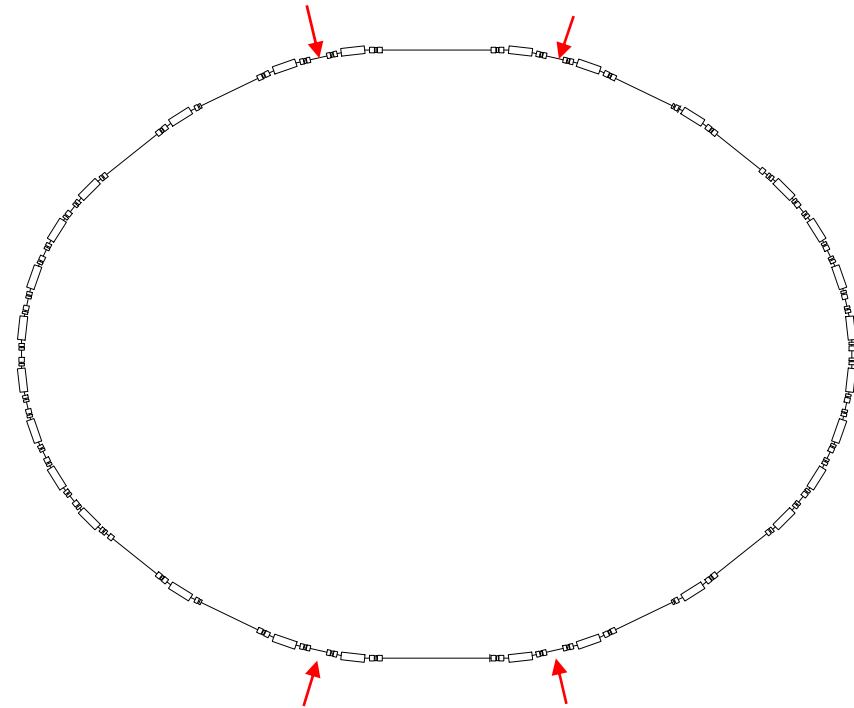
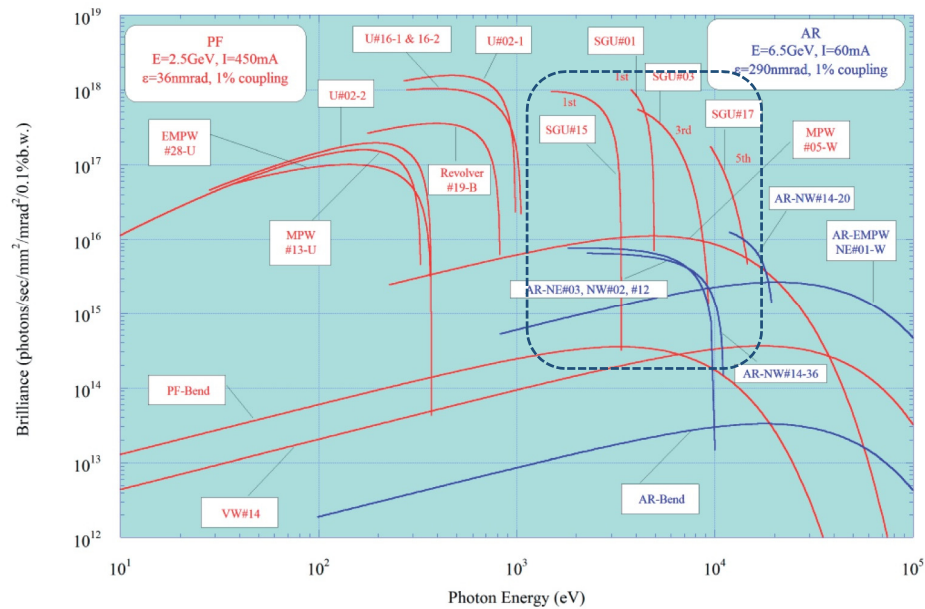
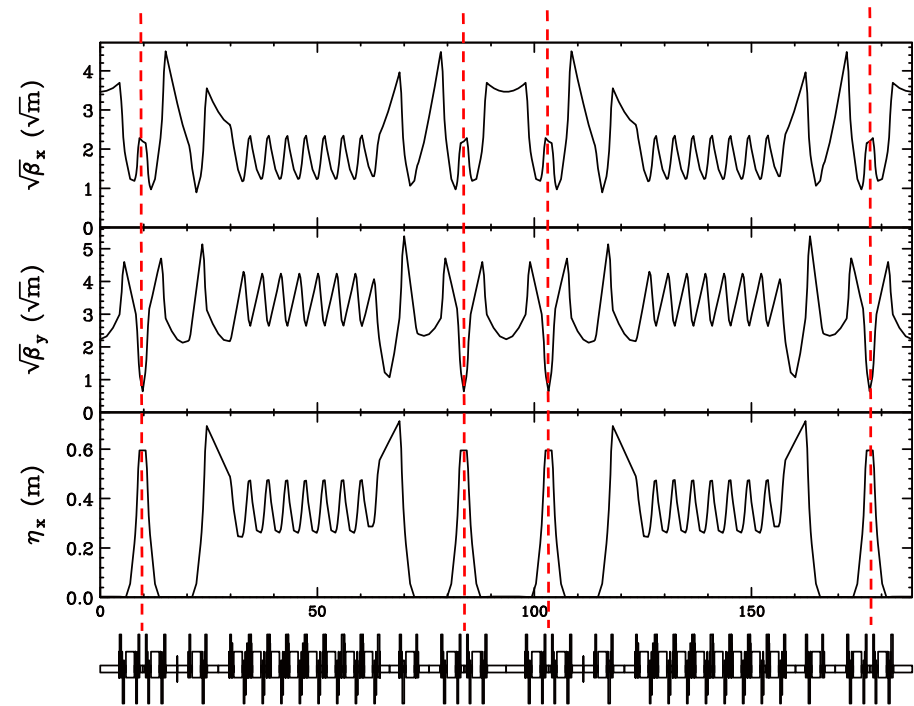
MAX IV は MBA 的なまま (分散大きい箇所を工夫して)、
ぎりぎりを追求して回した！

低エミッタンスのまま分散を大きくする為に……



- 進行方向に磁場（曲げ角）を変える偏向電磁石を採用する。（Longitudinal Gradient Bendという。）
- そもそも弱めの磁場でゆっくり曲げる。
- さらに、分散関数が大きくなりに従い、磁場を弱くしていく。
- 一定磁場にすると、エミッタンスは 1nmrad を超える。（2分割した方が良かったが、200pmrad 近くまで大きくなる。）
- 極低エミッタンスリングでは効果的。

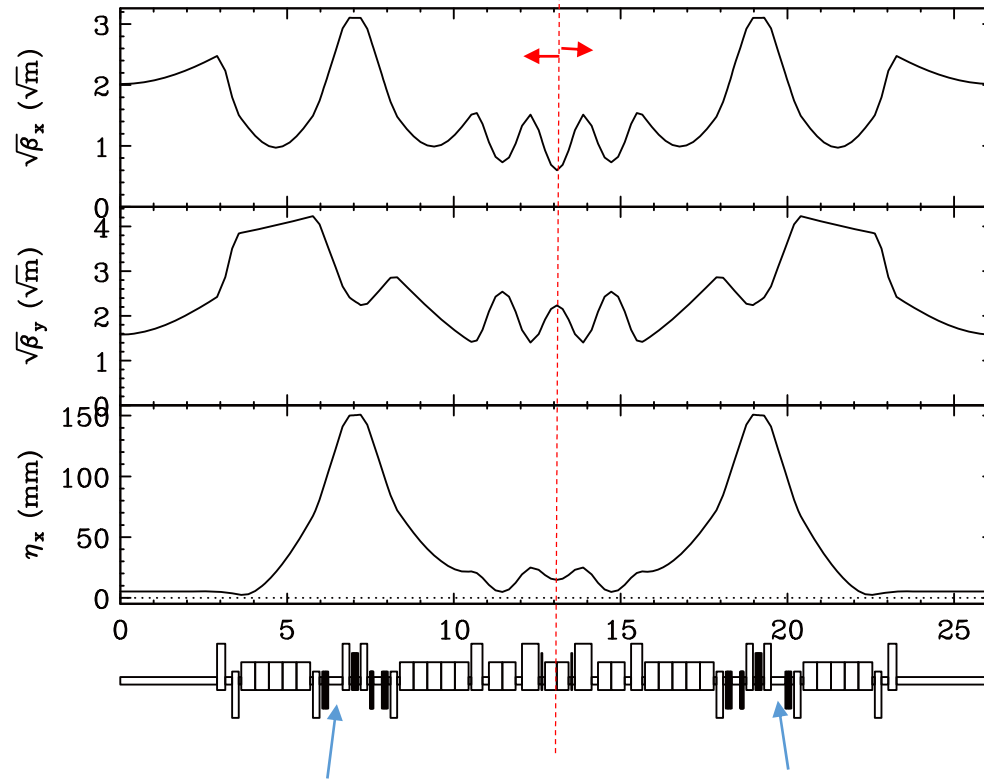
真空封止短周期挿入光源の活用



- 世界初の真空封止 ID は PF-AR で開発された。
- 3GeV で 20keV 程度まで出せる挿入光源は世界に広まり、「新」第3世代と言われることもある。
- PF では看板ビームラインに！
- 次期放射光でも最大限活用する。

真空封止短周期光源の為の短直線部の挿入

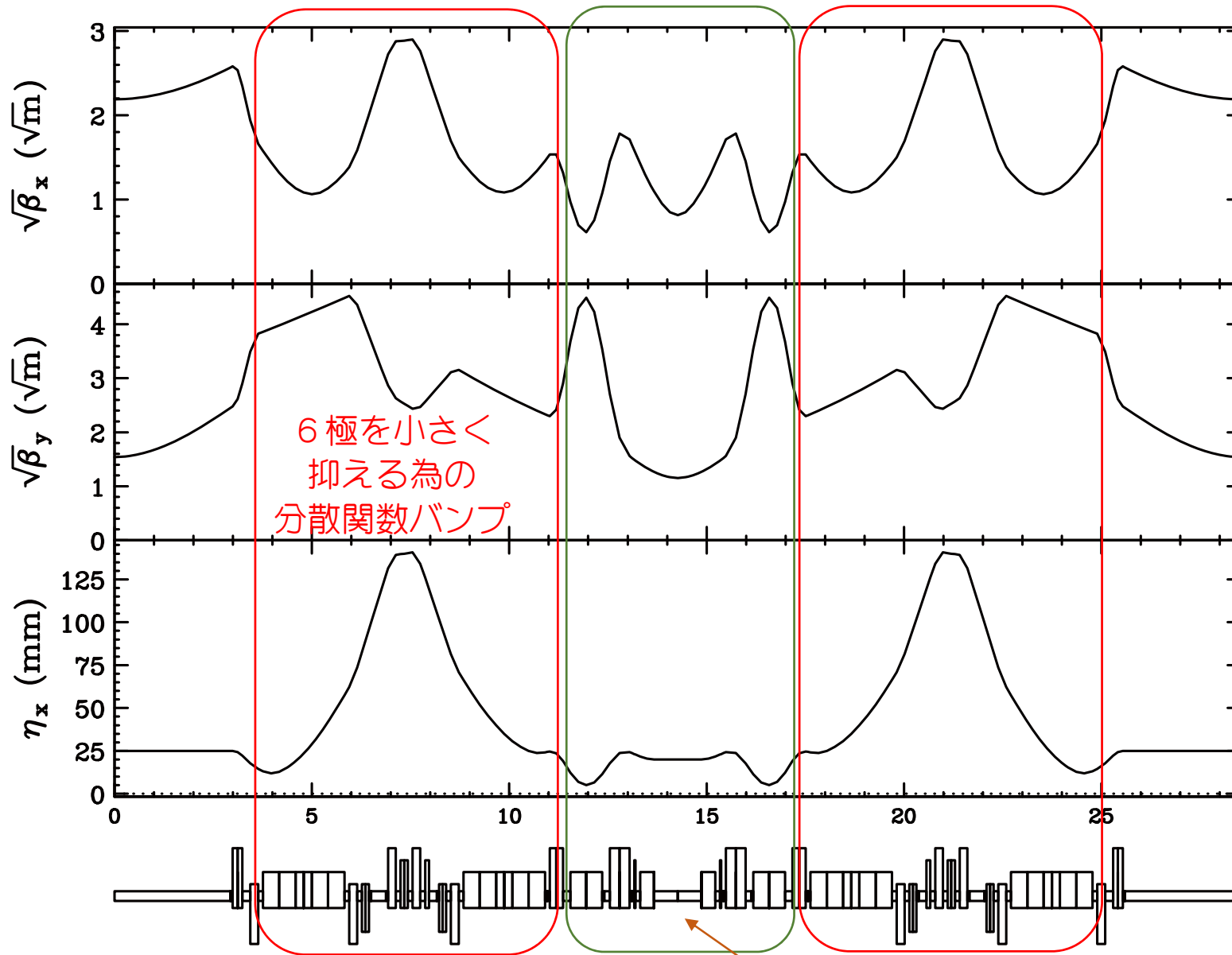
Original ESRF-HMBA



- PF 同様、分散バンプ内に短直線部を作るのは簡単でラティス構造としては最も無理がない。
- 分散、エネルギー広がりによる輝度の低下が非常に大きい。さらに、PF 同様、進行方向不安定性が起きた場合に影響が大きい。
- 5m 直線部同様に、「挿入光源に適した」短直線部をセル中央の分散、ベータとも小さい領域に入れることにした。
- ラティス構造としてはオリジナルの ESRF から離れ、新たな最適化が必要になる。(見かけほぼ同じだがビーム力学的には別の解になる。)

短直線部ありの ESRF 型 HMBA

低エミッタンスを実現する為に、機能結合型偏向電磁石で絞ったオプティクスの領域



6極を小さく抑える為の分散関数バンプ

6極間のチューンの進みを半整数にして非線形キックの影響を抑える。(KEKBで開発されたテクニックを ESRF でも採用。)

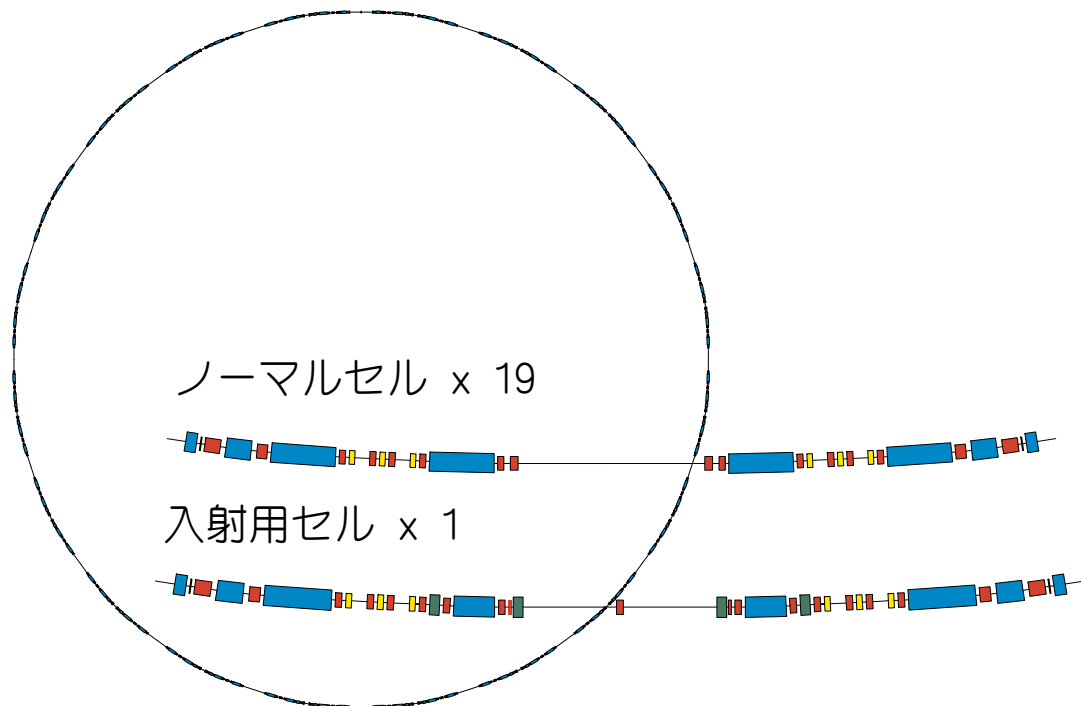
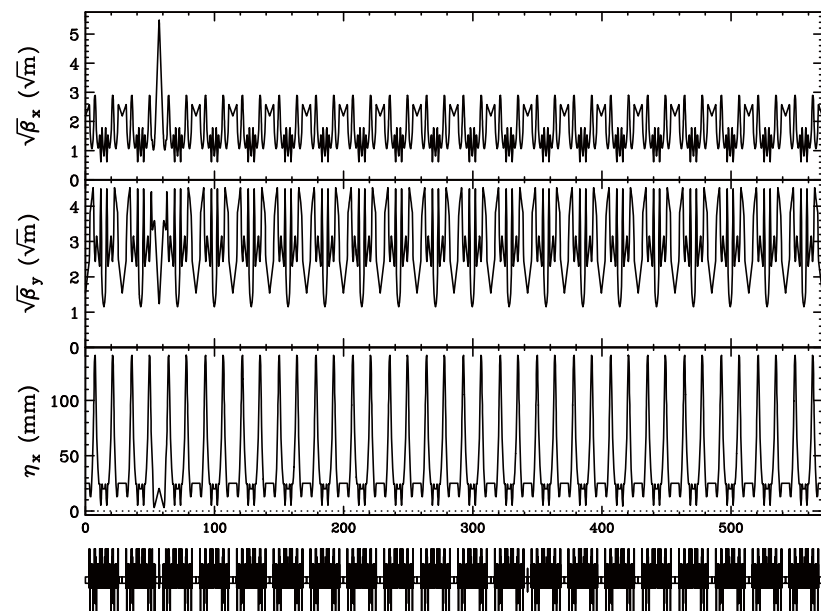
挿入光源に適した短直線部の挿入

パラメータ

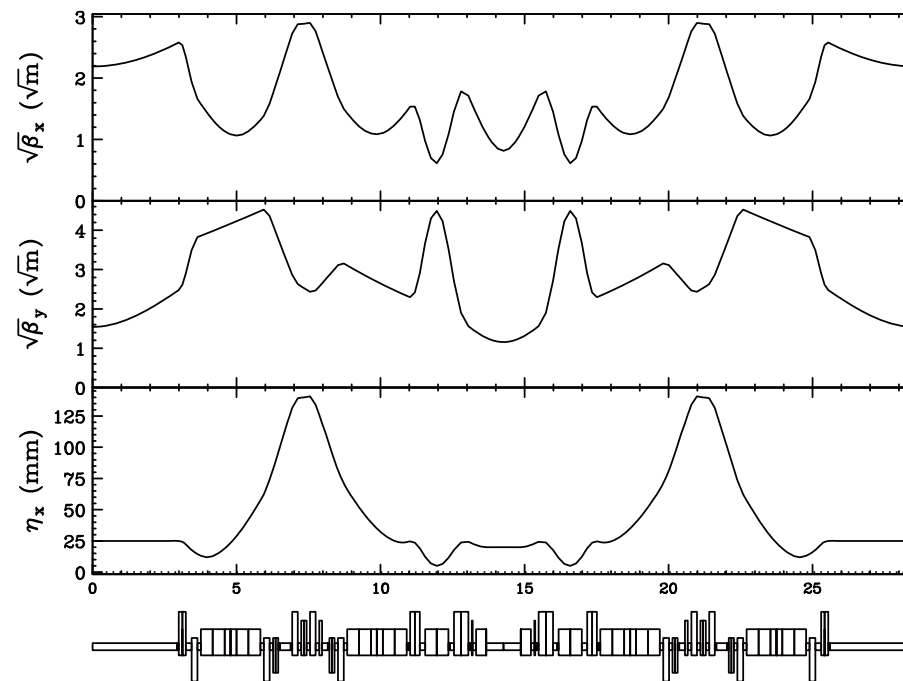
		v03_68	
エネルギー	E [GeV]	3GeV	
ラティスの型	-	HMBA (Hybrid Multi-Bend Achromat)	
周長	C [m]	570.7	
1.2m 短直線部数	本	20	
5.6m 長直線部数	本	20 (入射、RFを含む)	
セル数	セル	20	
RF周波数	f_{RF} [MHz]	500.1	
ハーモニック数	h	952	
RF電圧	V_{RF} [MV]	2.0	
バケットハイト	%	4.0	
エネルギー損失	MeV/rev	0.30	
モーメントムコンパクション	α	2.2×10^{-4}	
ベータトロン振動数	ν_x, ν_y	48.58, 17.62	
減衰時間(x, y, z)	[ms]	29.25, 38.28, 22.63	
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
タウシェック寿命	[h]	-	1.8
エネルギー広がり	$\times 10^{-4}$	6.4	7.9
バンチ長	mm	2.7	3.3
パルス幅	ps	9.1	11.1

リング1周のラティスとオプティクス

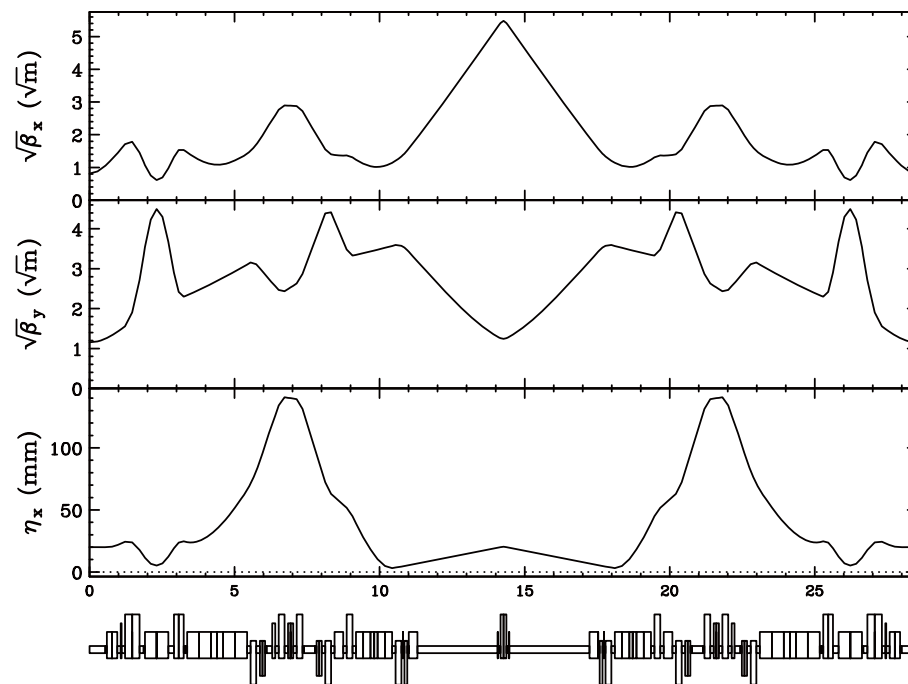
オプティクス (20 セル)



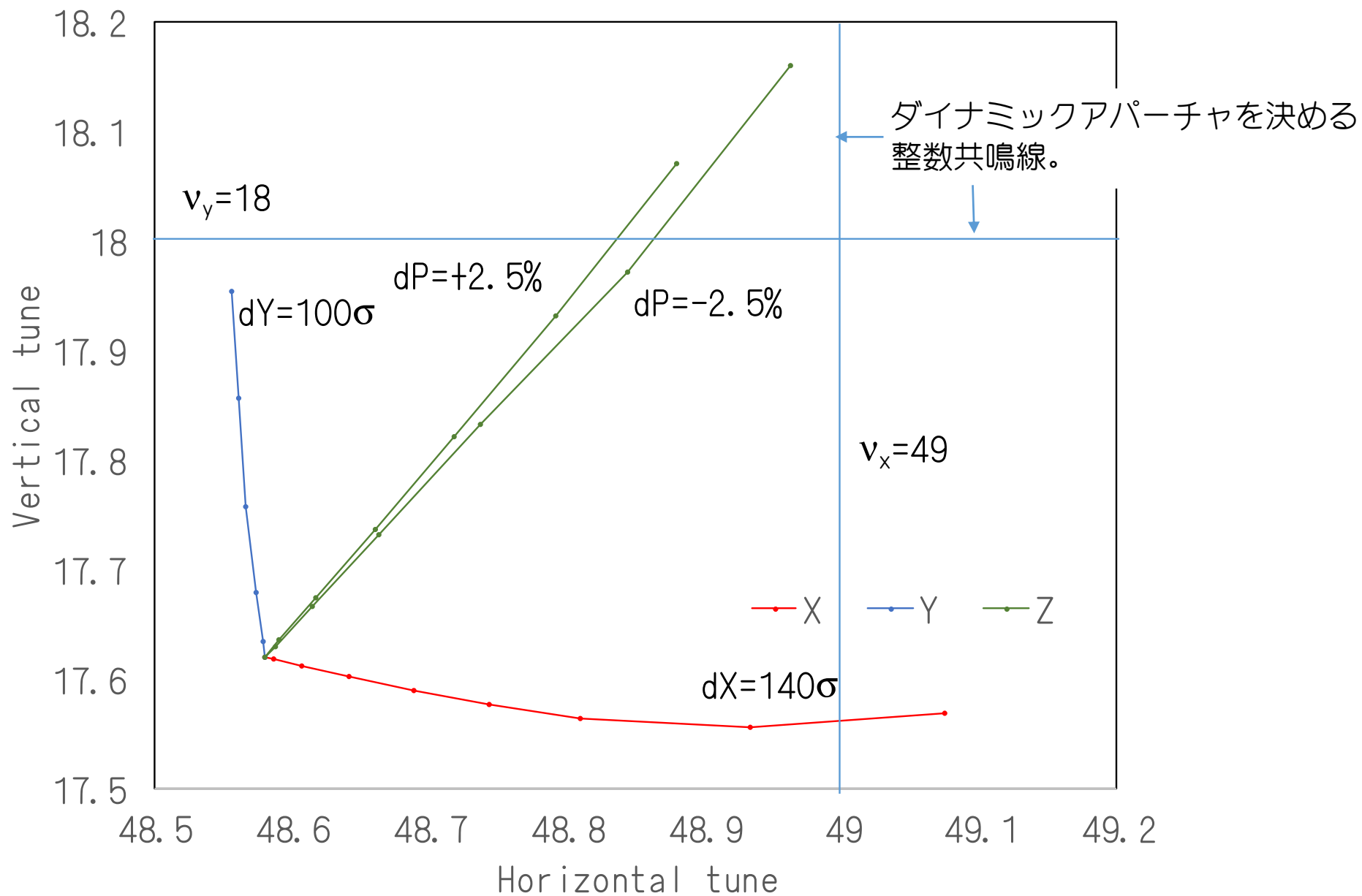
ノーマルセル



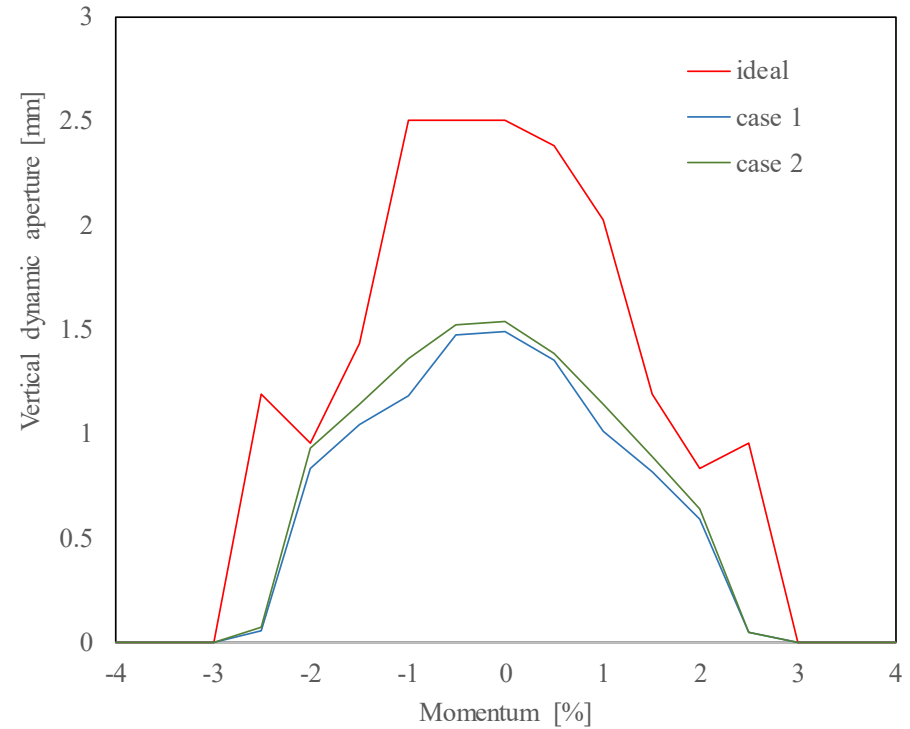
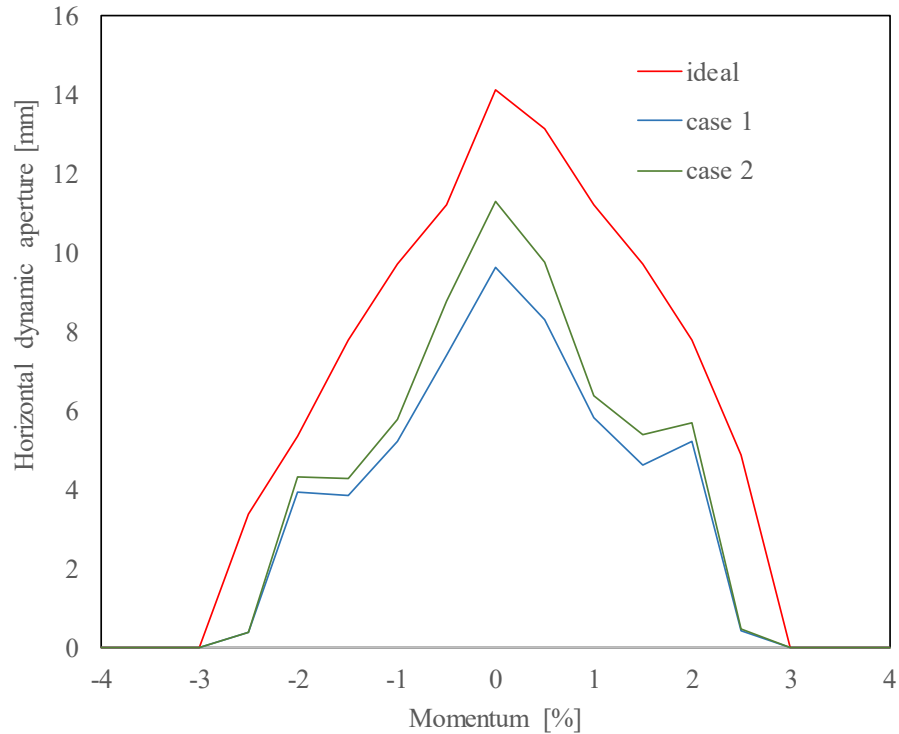
入射用セル



運転チューン、チューンシフトとダイナミックアパーチャ

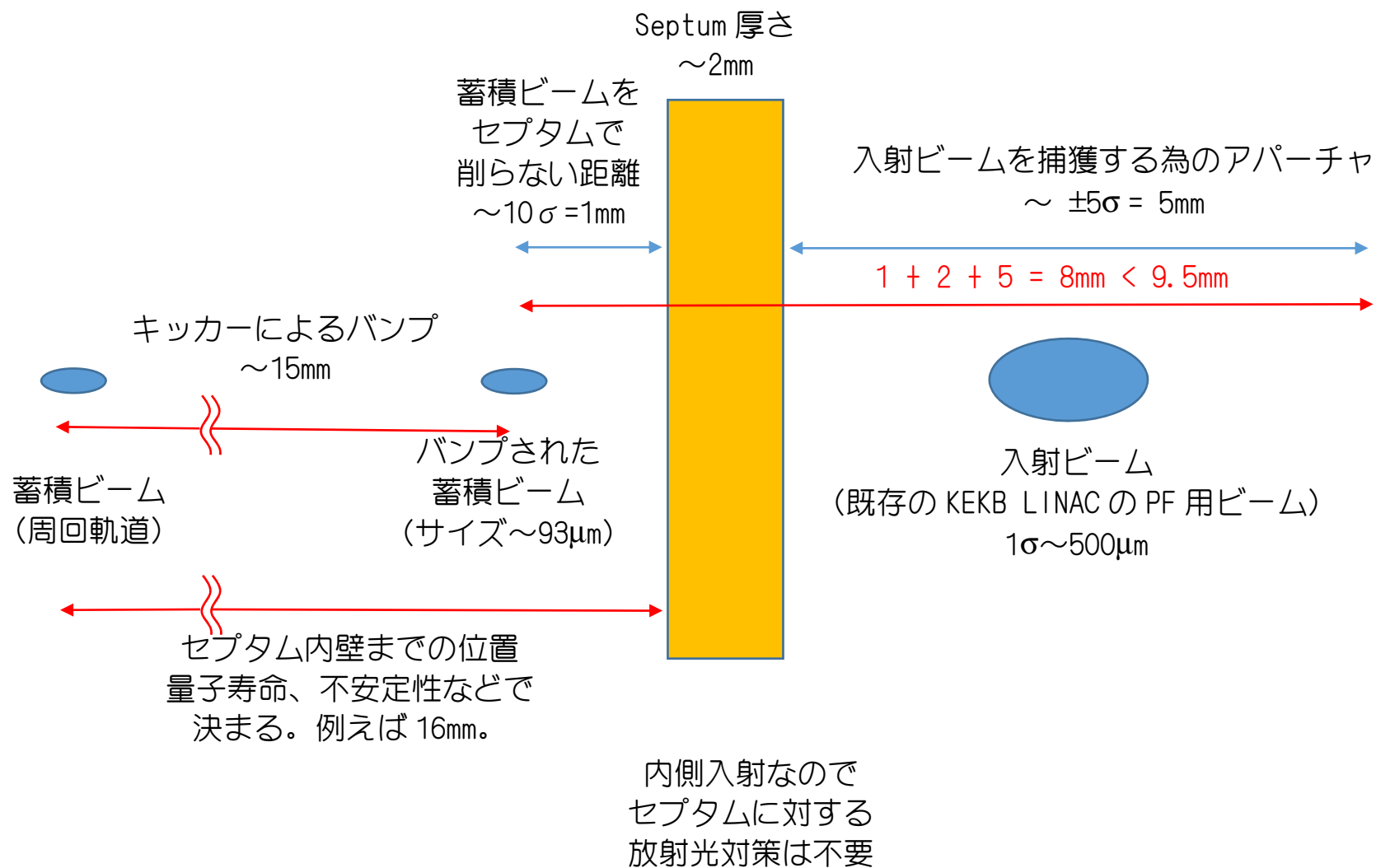


入射点での、誤差入りの実寸ダイナミックアパーチャ



- ideal は誤差なし、case1 はガウス分布の乱数誤差で、現状の PF と同じ大きさ、すなわち 1σ が据付誤差 $50\mu\text{m}$ 、磁場強さの誤差 0.05%、回転誤差 0.1mrad の場合で、case2 は誤差を小さめにして、それぞれ $40\mu\text{m}$ 、0.04%、0.1mrad にした場合。
- 入射点の光学関数は $\beta_x=28\text{m}$ 、 $\beta_y=1.7\text{m}$ 、ビームサイズは分散とエネルギー広がりの効果もありで、水平 $94\mu\text{m}$ 、垂直 $3.7\mu\text{m}$ となる。入射点の水平内側振幅方向のダイナミックアパーチャは case1 で 9.6mm、case2 で 10.8mm となる。
- 蓄積ビームサイズ 10σ で約 1mm、セプタム厚 2mm、今の PF 入射時の LINAC ビーム 10σ で 5mm なので、入射点で $1\text{mm} + 2\text{mm} + 5\text{mm} = 8\text{mm}$ でダイナミックアパーチャは十分である。

入射スキーム



CDR（作成中）に向けての検討

電磁石

- 4 極電磁石：最大磁場勾配約 50T/m。電磁軟鉄の飽和を避ける為には、磁極ボア直径を 3cm 程度にする必要がある。
- 6 極電磁石：特に問題なし。
- 進行方向に勾配のある偏向電磁石：テーパーで作ることを検討中。
- 機能結合型偏向電磁石：4 極的形狀で作り、補正コイルで 2 極磁場と 4 極磁場を独立に変えられるようにする検討中。4 極内の 2 極磁場には 6 極成分が出るので、補正用の薄い 6 極を併用する。

RF

- PF タイプの常伝導空洞を検討中。
- PF と比較すると、減衰時間と周長が長い為、不安定性の閾値が厳しくなる。より HOM を抑える為の設計改善が必要。
- 挿入光源が全数設置されると、放射ロスがリングの偏向電磁石だけの場合の 2 倍以上になる可能性がある。挿入光源の放射ロスの割合が大きい。
- 3 倍波空洞でエミッタンス増大や不安定性抑制を検討中。単純な空洞ではデチューニング角が大きく、不安定性源になる可能性がある為、超伝導 3 倍波空洞や RF パワー貯蔵空洞を連結した KEKB の ARES タイプなどの採用を検討中。

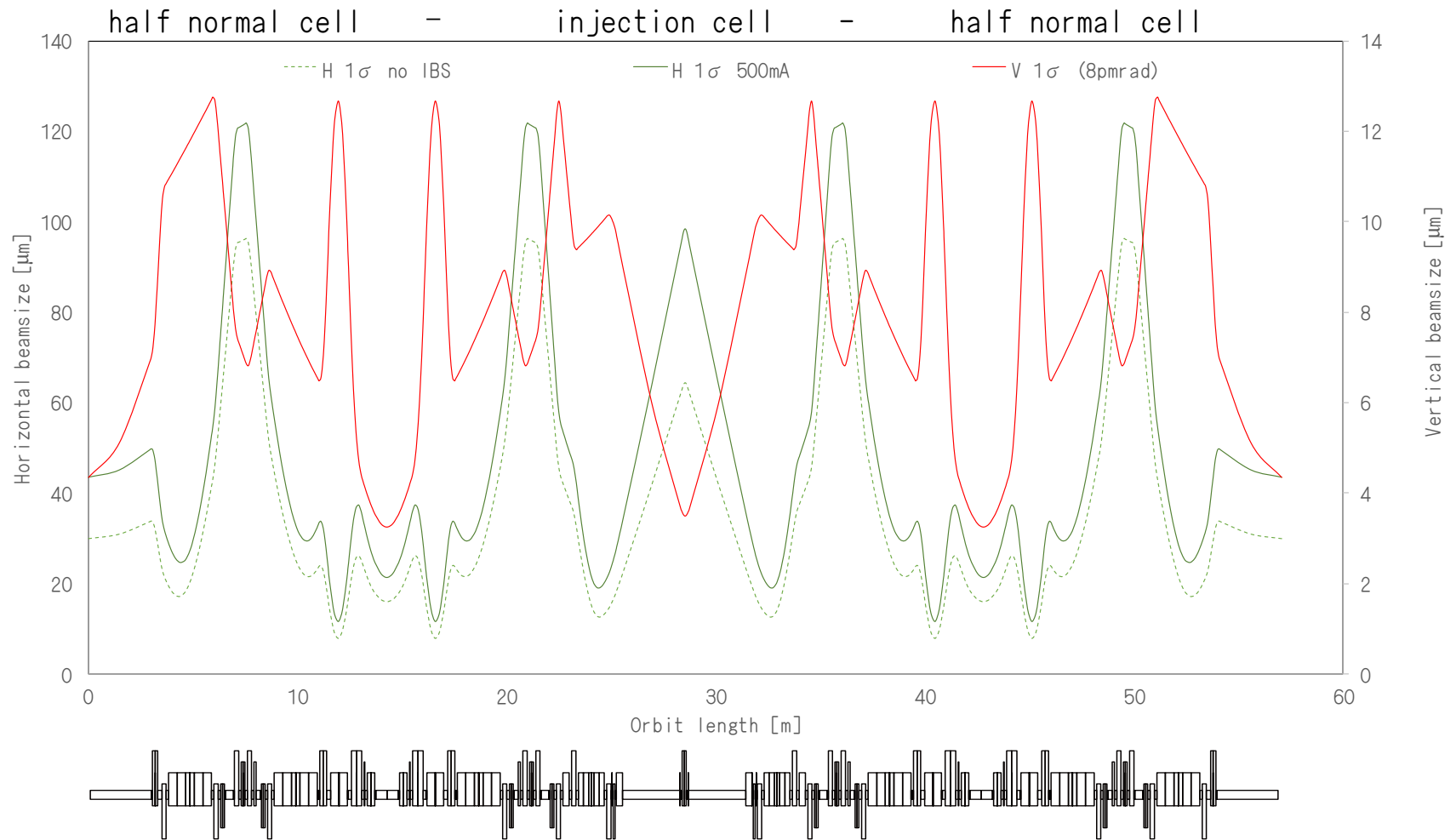
真空

- ダクトが細く、不安定性の閾値が厳しく、放射光が集中して出る。非常に難しい設計となるだろうが、原理的な不可能はない。

チャンネル

- 処理する必要がある放射光のパワーが非常に大きい。現状では PF-AR の基幹チャンネルが約 20kW を処理しており、それを基本に検討中。テーパ状の銅ブロックマスク。
- 大きさ的には、そのまま図に配置しても配置可能。

典型的なビームサイズ



- 典型的なビームサイズは、水平 $50\mu\text{m}$ 、垂直 $5\mu\text{m}$ 。
- ビーム安定化の目安は、PF ではビームサイズの $1/10$ としており、それと同じと考える。
- 水平 $5\mu\text{m}$ 、垂直 $0.5\mu\text{m}$ となる。

ビーム安定化

- BPM の測定精度は、300kHz で $0.3\mu\text{m}$ 、10kHz まで平均すると $0.07\mu\text{m}$ 。
- BPM 精度と軌道補正の精度、速度はサブミクロン補正が十分可能で問題はない。
- 最も重要なのは、振動源そのものを抑制すること。
 - 例えば 1~100Hz の周波数累積では、KEK では $0.1\mu\text{m}$ 程度の地盤振動がある。関東ローム層では、3Hz に固有振動があり、そのあたりのパワー密度が大きいことが原因である。
(山中の岩盤上ではこれが約 1/100 の 0.001μ の桁まで下がる。0.01Hz まで累積すると差はかなり小さくなる。)
 - 建物の杭打ちは不等沈下対策にはなるが、振動抑制にはならない。振動抑制には建物床剛性が効くが、限界がある。また、低い周波数ほど全体が同時に動く振動である。
 - 結局、 $0.1\mu\text{m}$ の振動を「増幅しない」ことが最重要。床→電磁石架台→電磁石磁場→ビーム軌道、と、通常は 100~1000 倍に増幅される。架台と電磁石設置を工夫することで、機械振動の増幅についてはほぼ完全に抑制することが可能。(ESRF や NSLS II の立地条件はつくばの条件とほとんど変わらない。) KEKB での補正経験などを考えても、軌道補正でビーム安定化は十分に可能である。
 - 機械式ポンプや空調など、振動源を床に伝えないことも非常に重要。
- 加速器要素開発としては、現時点で不可能なものはない。
- 簡単でもないので、プロトタイプの製作は必要不可欠。
- これから 1 年かけて詳細設計を進め (直接入射路等の建設を進めながら)、2017 年度にプロトタイプやテスト機器を製作、2018 年度に測定改良等を行えば、万全の準備完了。

まとめ

- 蓄積リング型光源の設計の向上により、従来 ERL でしか到達できなかった性能に手が届くようになった。
- 将来計画として、3GeV 周長 570m、自然エミッタンス 130pmrad のリングを設計した。直線部は 5.6m が 20 本 (RF と入射を含む)、1.2m の短周期挿入光源用が 20 本。
- ダイナミックアパーチャは、誤差あり、COD 補正ありで入射点で約 1cm。入射蓄積、タウチェック寿命にとりあえず問題はない。
- オリジナルの ESRF の完成度の高さを考慮すると、もっとダイナミックアパーチャを大きくできるはず (タウチェック寿命向上と入射の容易さの向上に繋がる) で、引き続き検討を続ける。直線部の分散も小さくできれば輝度、安定性の向上に繋がる。