

コヒーレンス光源をめぐる世界の技術動向と SPring-8 アップグレード計画

理研放射光科学総合研究センター
先端光源開発研究部門
回折限界光源設計検討グループ
田中 均

Outline

- 光源の低エミッタンス化の歩み
- 高コヒーレンスを可能にした最近の進展
- ESRFの高コヒーレンスリングへのアプローチ
- SPring-8のアップグレードにおける基本戦略
- 加速器設計の現状
- 課題と今後の検討スケジュール

2種類の高コヒーレンスリング型光源、 (蓄積型)とERL(非蓄積型)との一般的比較

	蓄積リング(蓄積型)	ERL(非蓄積型)
平均輝度	$10^{22} \sim 10^{24}$	$10^{22} \sim 10^{24}$
設置可能BL数	30~60本	30~60本
空間干渉度	数10%	数10%
ピーク輝度	$\sim 10^{25} \sim 10^{27}$	$\sim 10^{25} \sim 10^{27}$
パルス幅	長い(数10ps)	短い(100 fs~2 ps)
安定度	高い($\Delta E/E \sim 10^{-5}$, $\Delta I/I \sim 10^{-4}$)	低い(非蓄積型:未知数)
実験中断頻度	低い(平均Fault間隔>1日)	高い(非蓄積型:未知数)
運転信頼性	高い	低い(非蓄積型:未知数)
消費電力	小さい	大きい
主要機器開発リスク	低い	高い
費用対性能	高い	低い
放射線遮蔽	SPring-8と同程度	遙かに高い遮蔽を要する (非蓄積型:未知数)

1. 低エミッタンス化の歩み

1.1. 1980年初頭～2000年

- **Early days:** 挿入光源設置に最適化されたChasman-Green, TBAラティスの低エミッタンス化の指針

M. Sommer, "Optimization of the emittance of electrons (positrons) storage ring", Laboratoire de l'Accelérateur Lineaire, LAL/RT/83-15, 1983

Y. Kamiya and M. Kihara, "On the design guideline for the low emittance synchrotron radiation source", National Laboratory for High Energy Physics, KEK 83-16, 1983

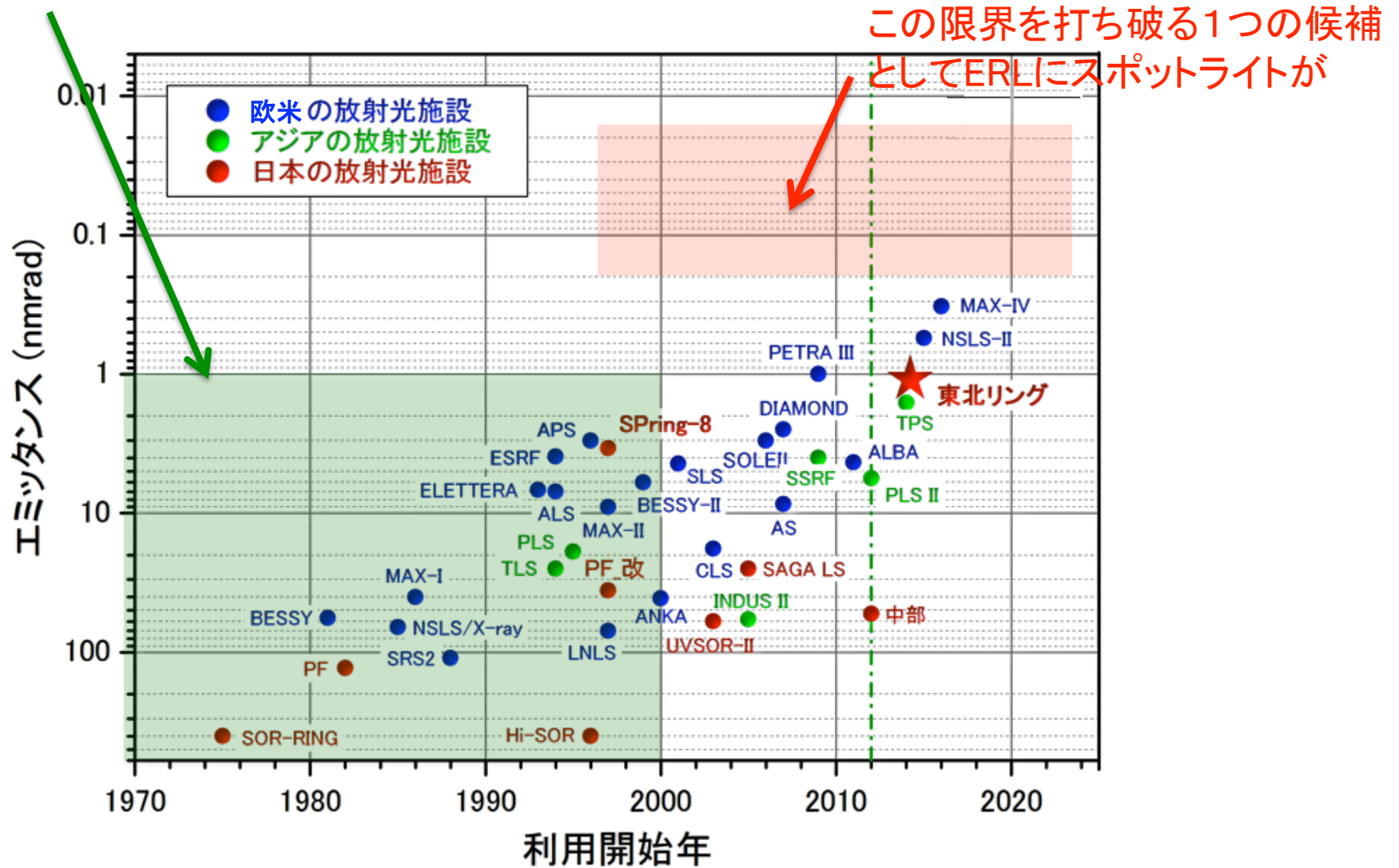
L. C. Teng, "*Minimum emittance lattice for synchrotron radiation storage rings*", Argonne National Laboratory, LS-17, 1985

- **Further emittance reduction based on CG and TBA:** 有効エミッタンスを導入してさらなるエミッタンスの低減化を目指す

L. Farvacque et al., "Possible retuning of the ESRF storage ring lattice for reducing the beam emittance", Proc. of EPAC'94, 1994, pp. 612-614

H. Tanaka and A. Ando, "Minimum effective emittance in synchrotron radiation sources composed of modified Chasman Green lattice", *NIMA* **369** (1996) 312

1nmradを下回るエミッタンスを現実的な周長で実現できない時期が長く続いた



1.2. 2000年～2011年

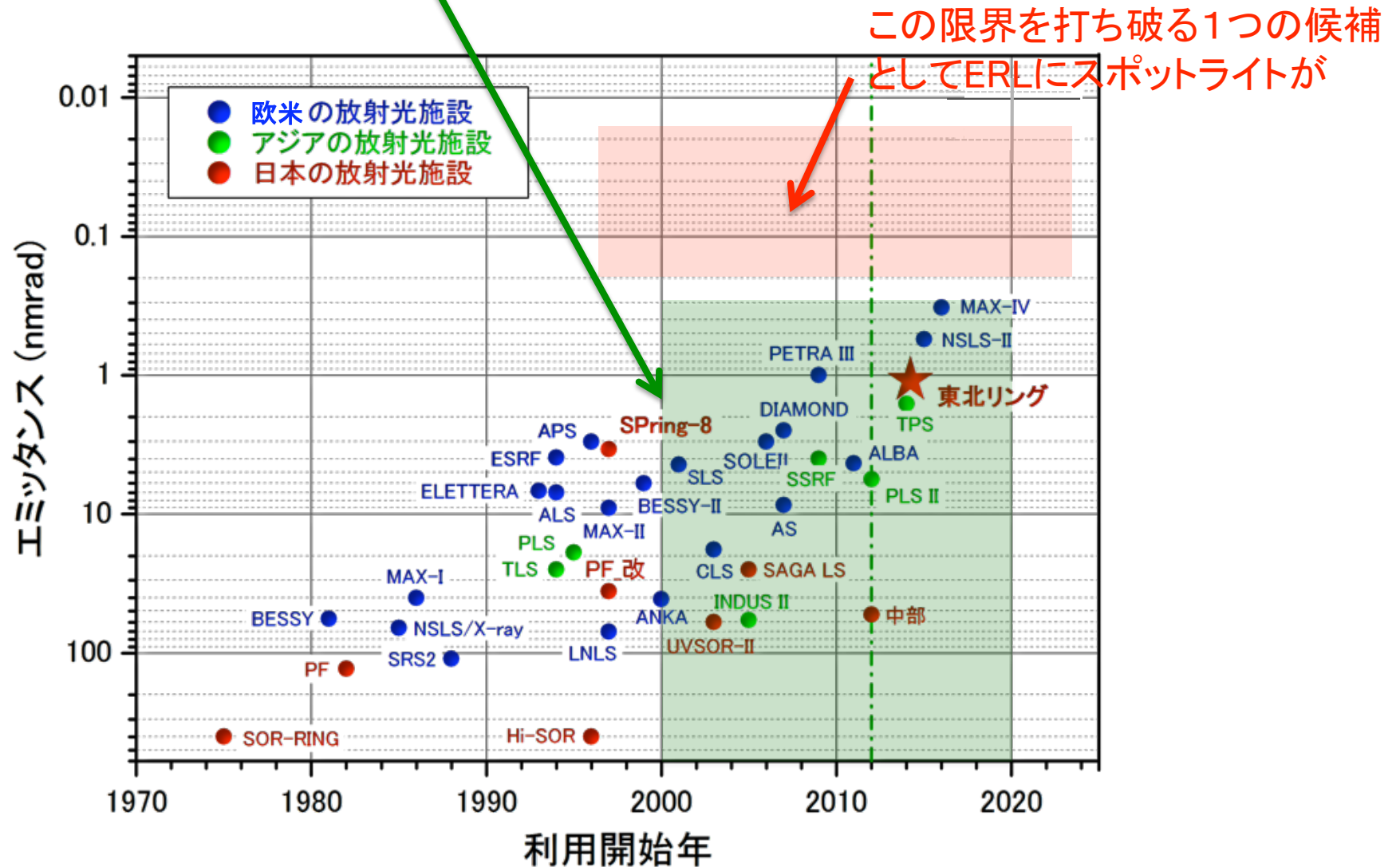
- Emittance reduction with MBA+Exotic BM: 1nmradを下回る挑戦的マルチベンドが登場

R. Nagaoka and A. Wrulich, “Emittance minimisation with longitudinal dipole field variation”, *NIMA* **575** (2007) 292

M. Eriksson et al., “Some small-emittance light-source lattices with multi-bend achromats”, *NIMA* **587** (2008) 221

Chun-xi Wang, “Minimum emittance in storage rings with uniform or nonuniform dipoles”, *PRSTAB* **12**, 061001 (2009)

1nmrad を下回るエミッタンスが3 GeVのミディアムエネルギー
可能に



X線をアンジュレータの基本波でだせる条件には届かず

2.高コヒーレンスを可能にした 最近の進展

2.1.有限周長での低エミッタンス化の困難さ

エミッタンスのスケールリング

$$\epsilon_{nat} = C_q \frac{\gamma^2 \langle H/\rho^3 \rangle}{J_x \langle 1/\rho^2 \rangle} \propto \frac{\gamma^2 \theta^3}{J_x}$$

γ : Lorentz factor

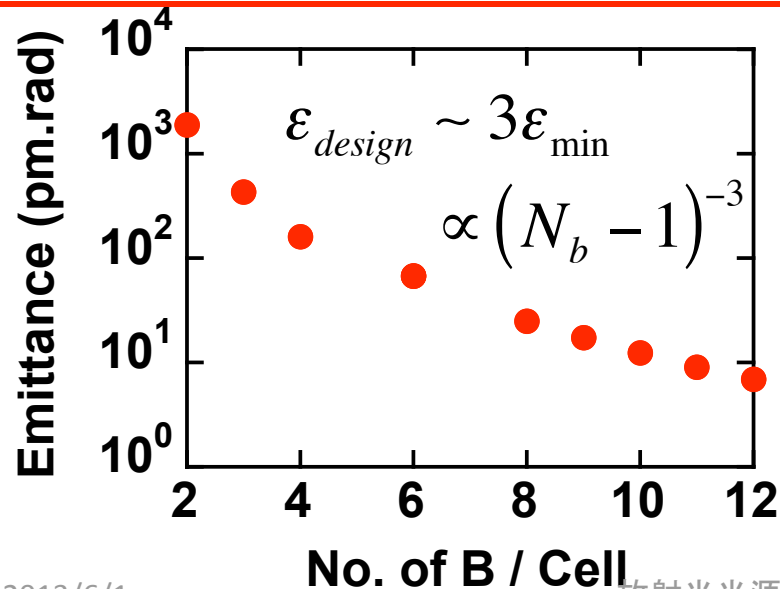
θ : Bending angle

ρ : Bending radius

H : H-function

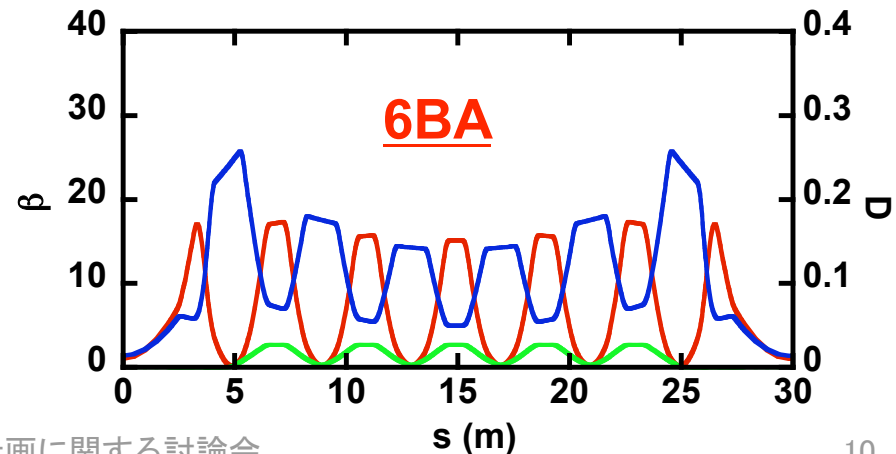
J_x : Damping partition number

マルチバンド化によるエミッタンスの低減



強い6極電磁石と極端に小さいDA

SX ~13000 T/m², Q ~80 T/m



2.1.有限周長での低エミッタンス化の困難さ

直面した2つの大きな問題

- 限定された周長のもとで偏向電磁石の数を増加 → Focal Length が逆比例して短く → 強い4極電磁石
- 多数の強収束4極 + 低分散関数 → 強い6極電磁石

問題1: 製作並びに運転が困難な4極、6極電磁石が必要

-
- 強い6極電磁石の誘起する複雑な構造共鳴の励起
 - 少数の支配的構造共鳴線の抑制では制御不能

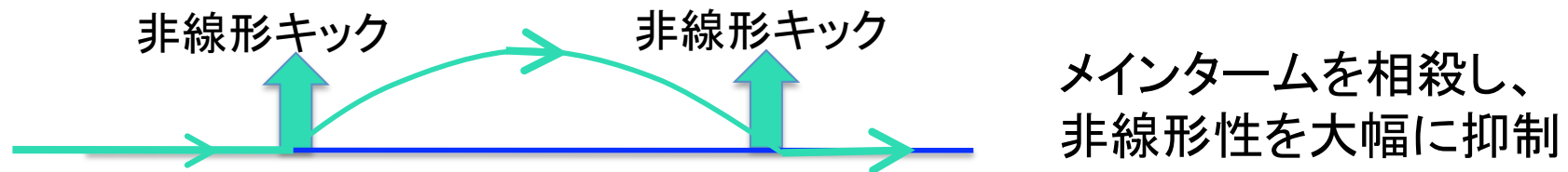
問題2: 安定運転に必要なダイナミックアパーチャを確保できない

現実に建設・安定運転が不可能なリングとなる

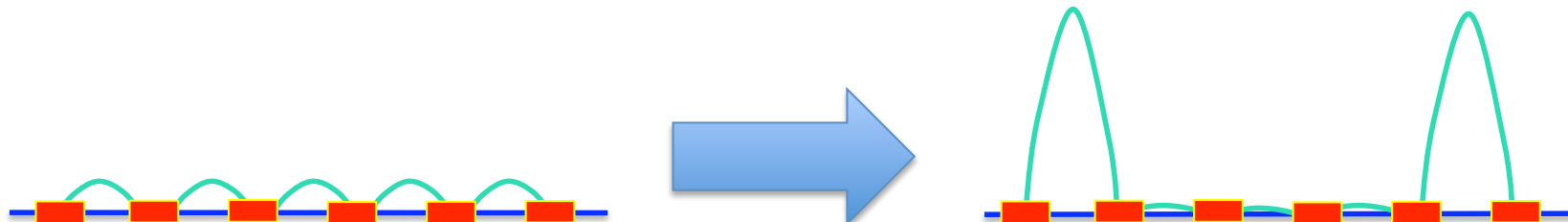
2.2. 4つのアイデアが限界突破を実現

限定されたリング周長においても以下の4つのアイデアを導入することで100 pmradに迫るエミッタンスを実現

アイデア1: 6極ペアを位相 π 離して配置 (interleaved SX pairs)



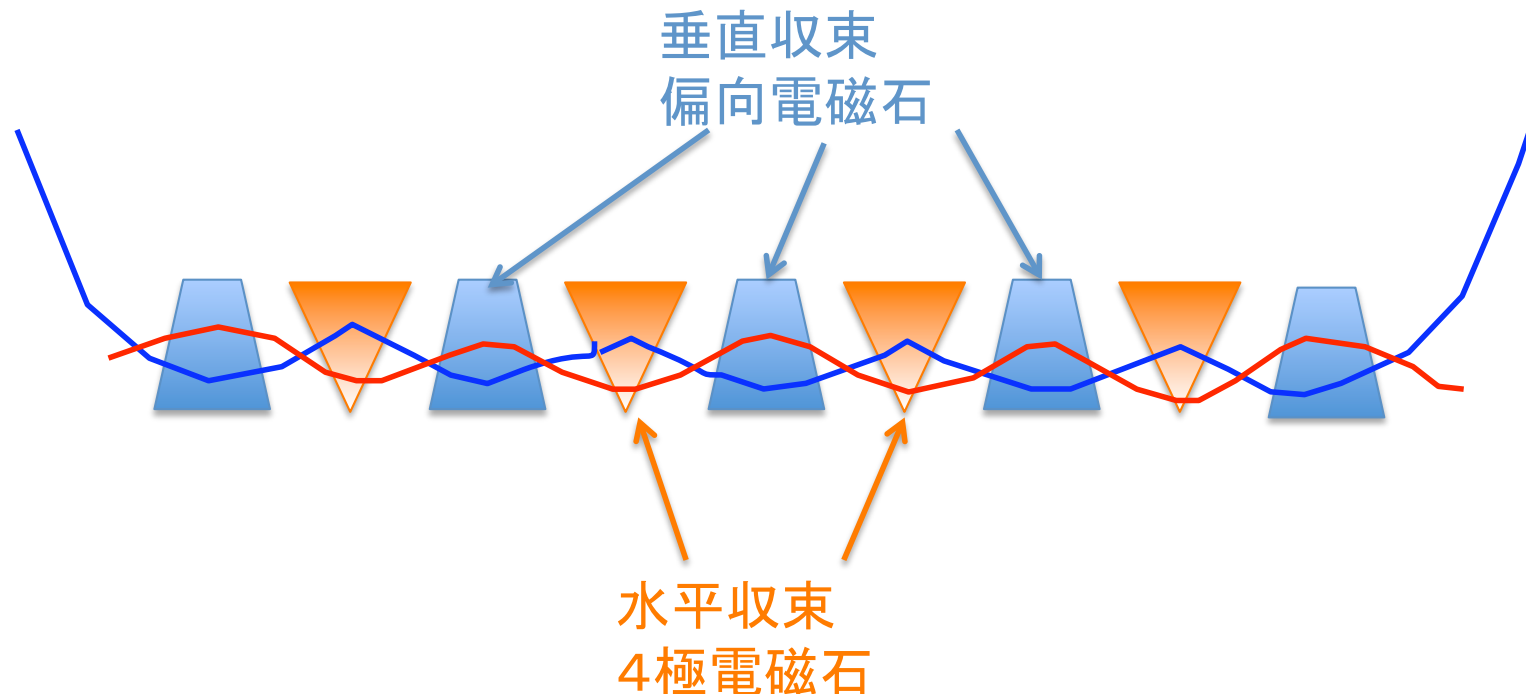
アイデア2: マルチバンドセル内のエネルギー分散分布の対称性を敢えて崩し、分散のピークを生成し、そこに6極電磁石を集中配置



2.2. 4つのアイデアが限界突破を実現

限定されたリング周長においても以下の4つのアイデアを導入することで100 pmradに迫るエミッタンスを実現

アイデア3: 垂直収束偏向電磁石を用いた低ベータ、低エネルギー分散チャンネルによる位相整合と低クロマチシティの両立



2.2. 4つのアイデアが限界突破を実現

限定されたリング周長においても以下の4つのアイデアを導入することで100 pmradに迫るエミッタンスを実現

アイデア4: 8極電磁石による振幅依存チューンシフトの制御

初めて、

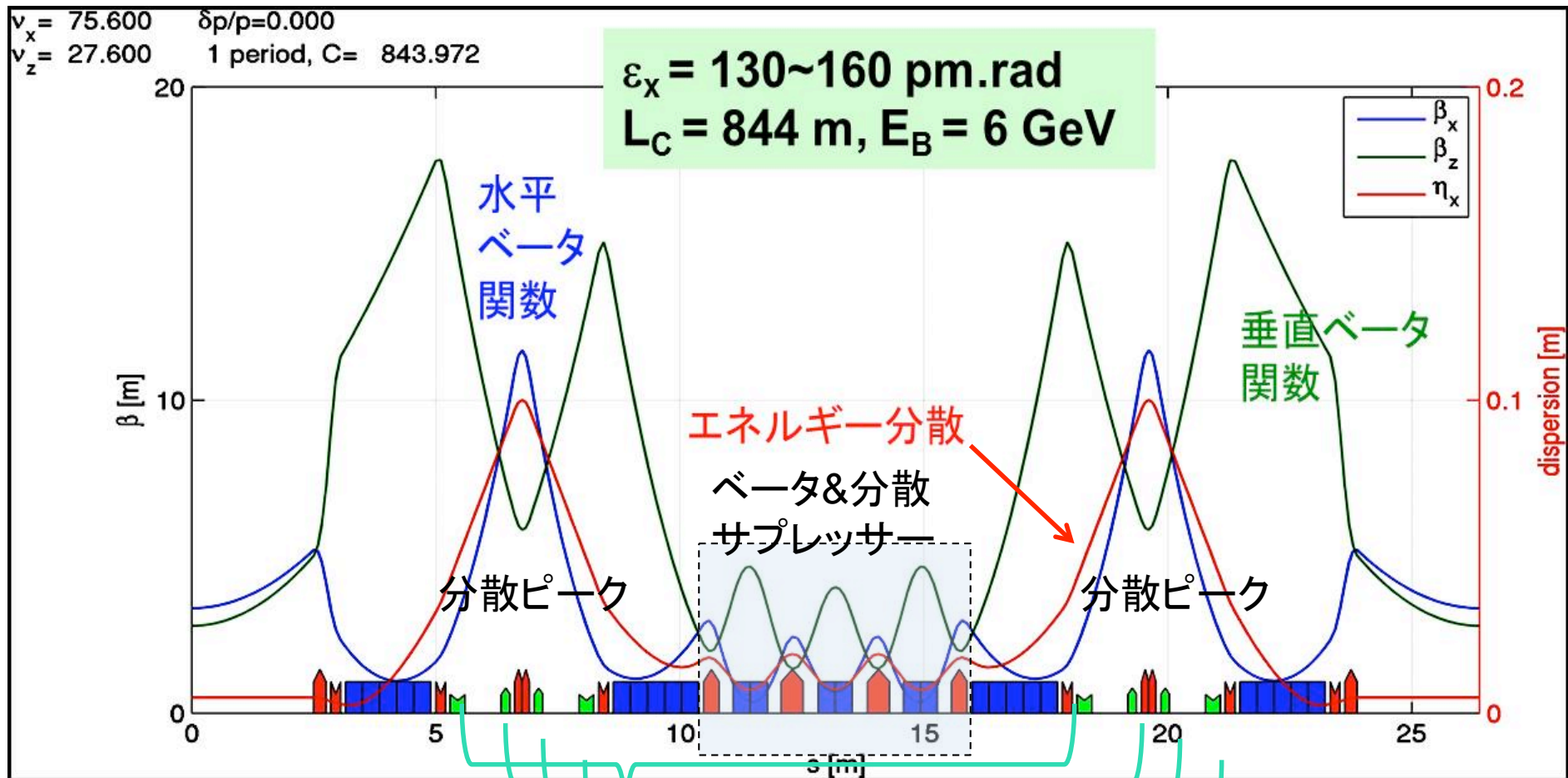
6 GeVという高い電子ビームエネルギーで
広い電子の線形振動領域を確保した
100 pmradに迫る極低エミッタンス

が実現

3. ESRFの高コヒーレンスリングへのアプローチ

3.1. Linear Optics

対称性を取えて崩れているので、分布全体としては美しくないが...

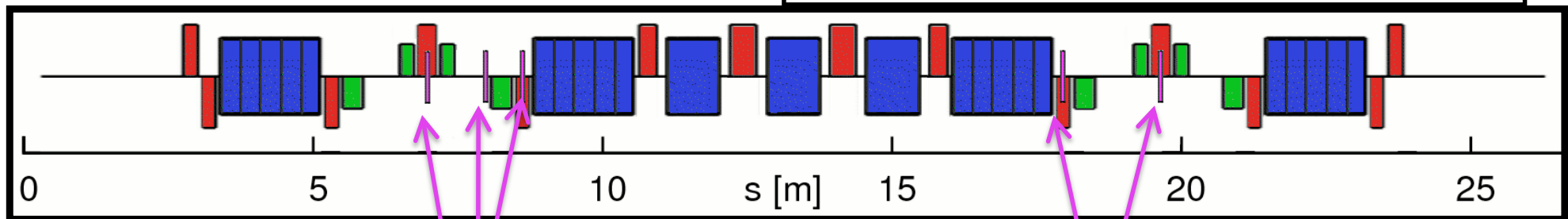
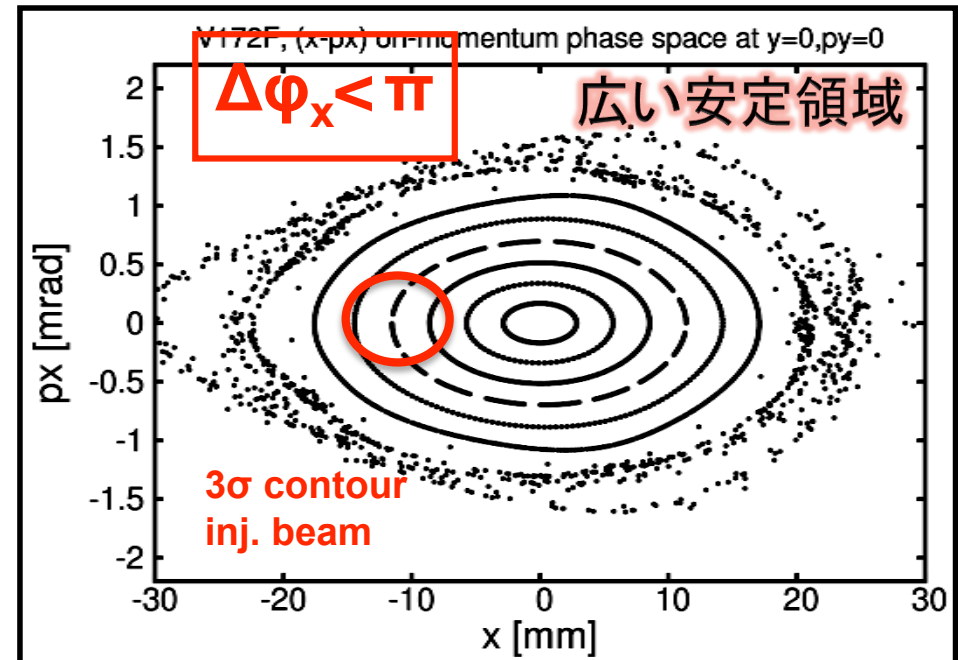
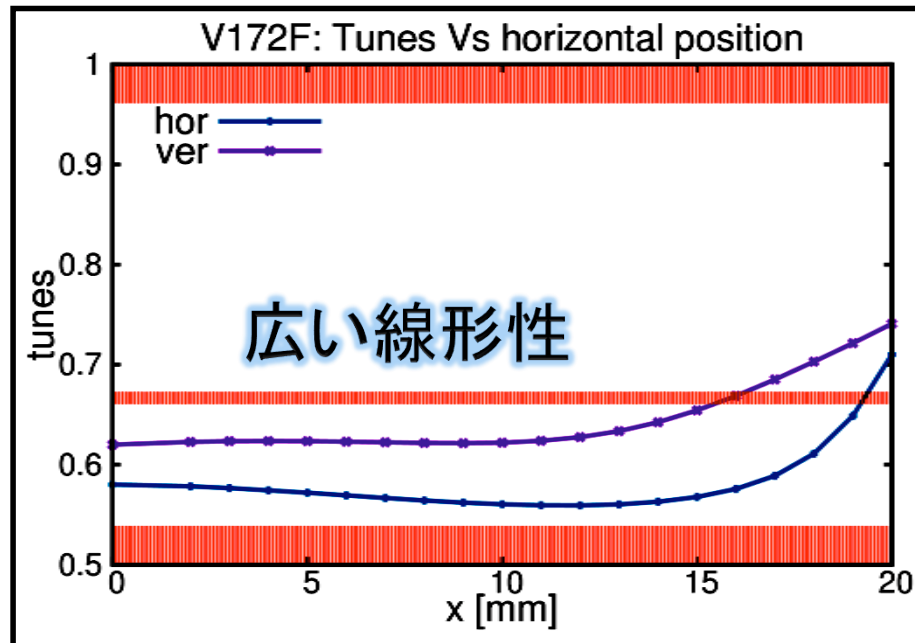


位相整合条件を満たした6極 6極 6極 6極

3.2. 常識を越えた低クロマティシティの実現

Parameter	Existing Lattice	New Lattice
Energy, E [GeV]	6.03	6.03
Circumference, C [m]	844	844
Tune, ν_x, ν_y, ν_s	36.44, 13.39, 0.0054	75.60, 25.60, 0.0034
Emittance, ϵ_x, ϵ_y [pm · rad]	4000, 5	160, 5
Bunch length, σ_z [ps]	15.6	11
Energy spread, σ_δ	$1.06 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$
Momentum compaction	$17.6 \cdot 10^{-5}$	$8.7 \cdot 10^{-5}$
Natural chromaticity, ξ_{x0}, ξ_{y0}	-130, -58	-97, -79
Energy loss per turn, U_0 [MeV]	4.9	3.05
RF voltage, V_{RF} [MV]	8	6
RF frequency, f_{RF} [MHz]	352	352
Harmonic number	992	992
Beta at ID center, β_x, β_y [m]	37.6, 3.0 (high β) 0.35, 3.0 (low β)	3.35, 2.79
Beam size at ID center, σ_x, σ_y [μm]	413, 3.9 (high β) 50, 3.9 (low β)	24, 3.7
Beam div. at ID center, $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$ [μrad]	10, 1.3 (high β) 107, 1.3 (low β)	6.8, 1.3

3.3. 現状の第3世代リング並の安定性



8極電磁石の導入

8極電磁石の導入

HMB lattice V172-F

4. SPring-8のアップグレード における基本戦略

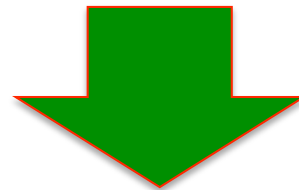
4.1. 境界条件

- 現蓄積リングトンネルを使用
- 挿入光源BLの位置は不変
- 電子ビーム入射点も変更せず
- SACLAを入射器として使用
- 工事期間直前までユーザー運転を実施し、加速器入れ替えは1年間で

4.2. 目標性能と実現可能性の両立

エミッタンスの低減 +

- 鉄コアで製作可能な強さの電磁石
- 現実的な電磁石間スペース(アブソーバーや入射電磁石、モニター類の設置スペース)
- 安定な入射・蓄積が可能な動的安定性
- 現実的な磁場誤差と設置誤差



1. 6極電磁石の非線形性の抑制
2. 偏向角の細分化を緩和するエミッタンス低減化策の導入

4.3. 6極電磁石の非線形性の抑制

1. 6極電磁石の磁場分布の改良

6極磁場が磁場中心付近のみに局在化できれば、大振幅での安定性は格段に改善

長所: Singletで使用できるので線形Opticsの設計が容易

短所: 全く新しい挑戦であり、開発の目処が簡単に立たない

2. 位相整合6極電磁石ペアによる非線形性の実効的抑制

少なくとも設計エネルギーでは非線形性は大幅に抑制可能

長所: SPring-8でも既に実施済み、KEKB等でも豊富な使用実績

短所1: 位相整合条件を課したペアを用いるので、線形Opticsの設計に大きな制約条件

短所2: 位相整合条件が崩れるエネルギー偏差への最適化が課題

4.4. 新たなエミッタンス低減化策

「重ね合わせ可能」がキーワード

Equation of natural emittance:

$$\varepsilon_{nat} = C_q \frac{\gamma^2 \langle H / \rho^3 \rangle}{J_x \langle 1 / \rho^2 \rangle}$$

Emittance reduction schemes:

1. Optimization of dipole field (ρ) in longitudinal (inside dipole and / or inside unit cell)
2. Reduction of stored energy (γ) with the help of advanced undulator design
3. Damping partition number (J_x) control
4. Damping enhancement by additional radiation
5. Sophisticated optimization to approach to the theoretical minimum ($\varepsilon_{design} / \varepsilon_{min} < 3$)
6. Other reduction schemes

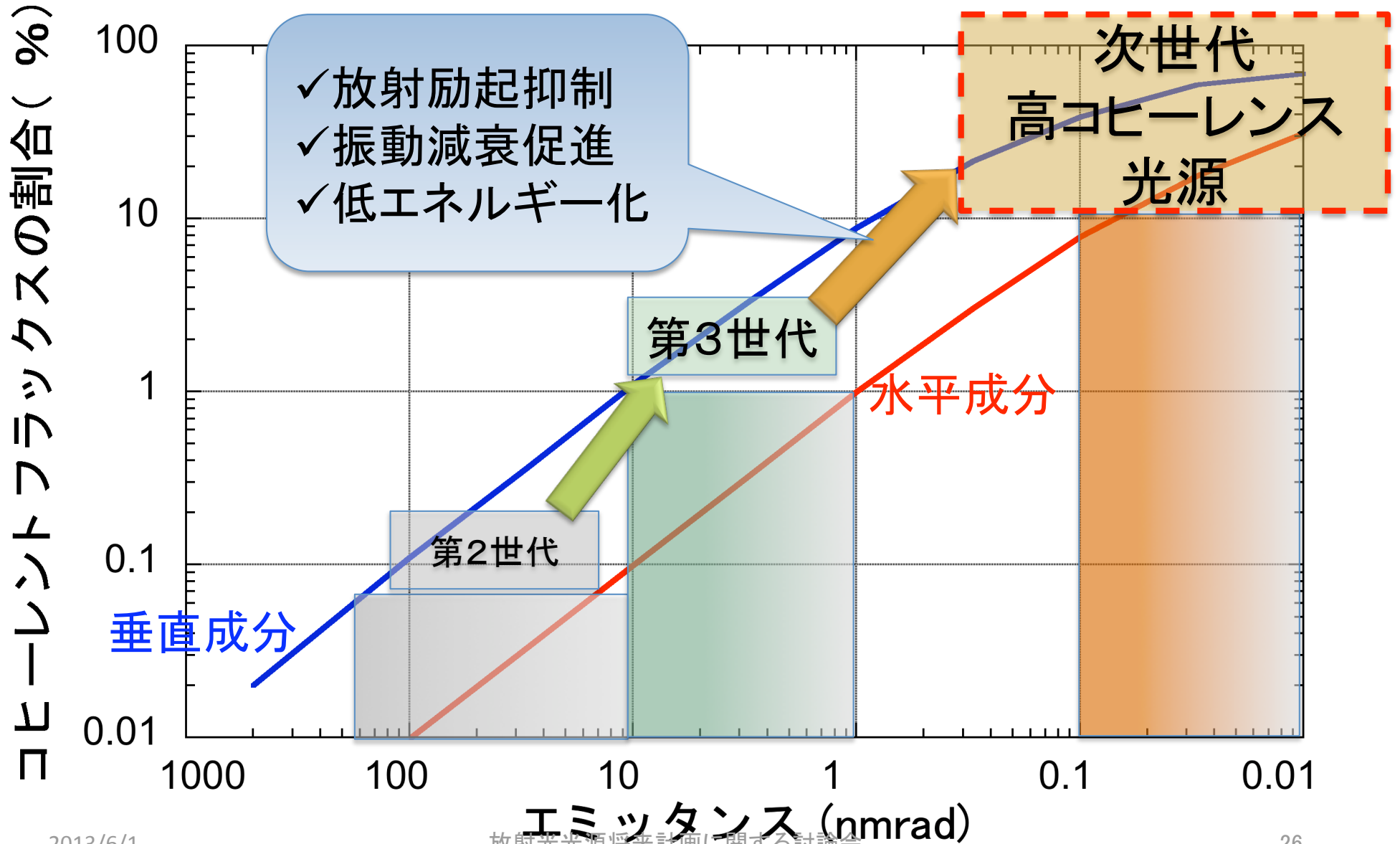
4.5. Emittance Reduction Budget

In order to optimize the ring design by **integrating several schemes**, concept of “emittance reduction budget” is useful especially for the upgrade of the existing rings

Item	Dependence	Value (Old→New)	Reduction Gain 基準は7 nm.rad
Beam Energy γ	γ^2	8 GeV → 6 GeV	1.8
Bend angle θ	θ^3	2BA → 3BA 2BA → 4BA	8.0 27.0
Dipole field optimization	$\langle H / \rho^3 \rangle / \langle 1 / \rho^2 \rangle$		~2.0
Damping enhancement	Damping by ID, D.W.		1.4
Damping partition number control	$1 / J_x$	$J_x = 1 \rightarrow J_x = 2$	2.0
Optics optimization	$\epsilon_{\text{design}} / \epsilon_{\text{min}}$	~3 → ~2.5?	1.2 <i>78 pm.rad ~ 23 pm.rad</i>
Total			90(3BA) ~ 300(4BA)

5. 加速器設計の現状

5.1. 目標電子ビーム性能



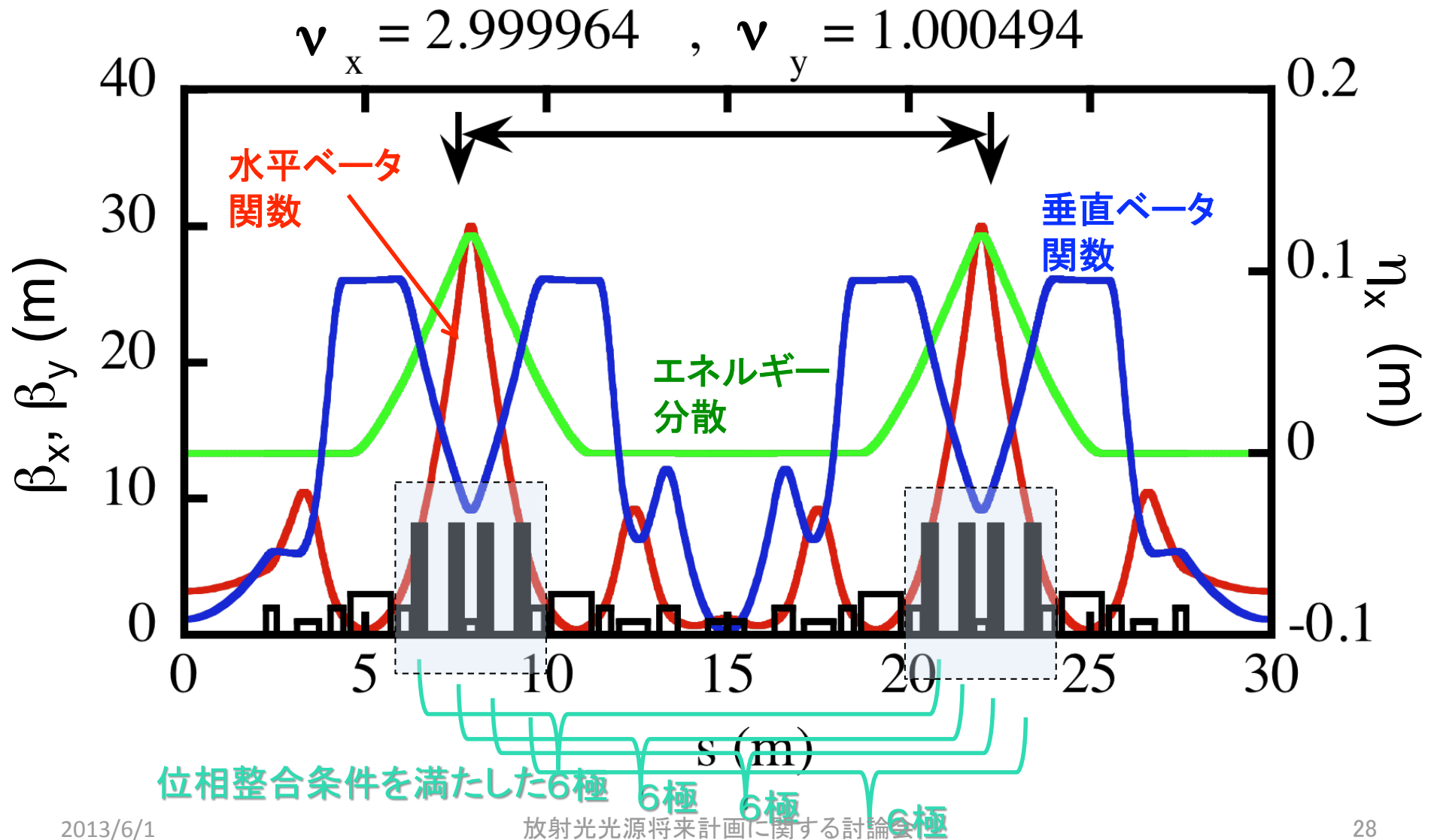
5.2. 現時点での電子ビーム性能 (暫定)

	SPring-8	SPring-8 II
Electron energy	8 GeV	6 GeV
Stored current	100 mA	
Lattice	DB	DBA x 2
Natural emittance	3400 pm.rad	274 pm.rad ^{*1} 98 pm.rad ^{*2}
Tune	(40.14, 19.35)	(118.82, 47.71)
Natural chromaticity	(-88, -42)	(-295, -223)

*1 w/o emitt. contr.

*2 w emitt. contr.

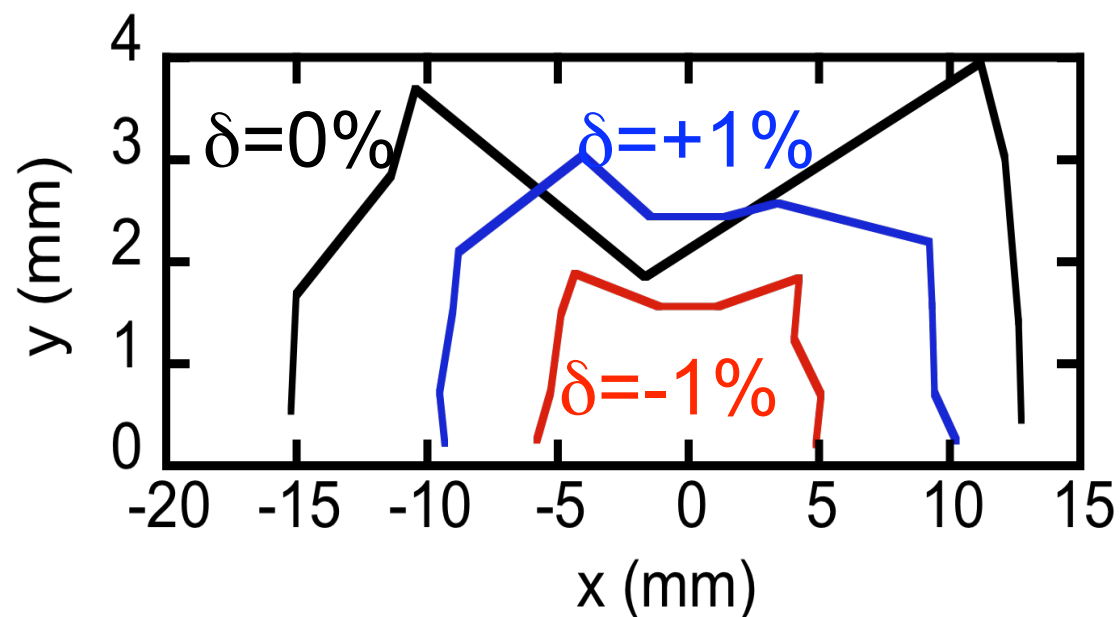
5.3. Linear Optics (暫定)



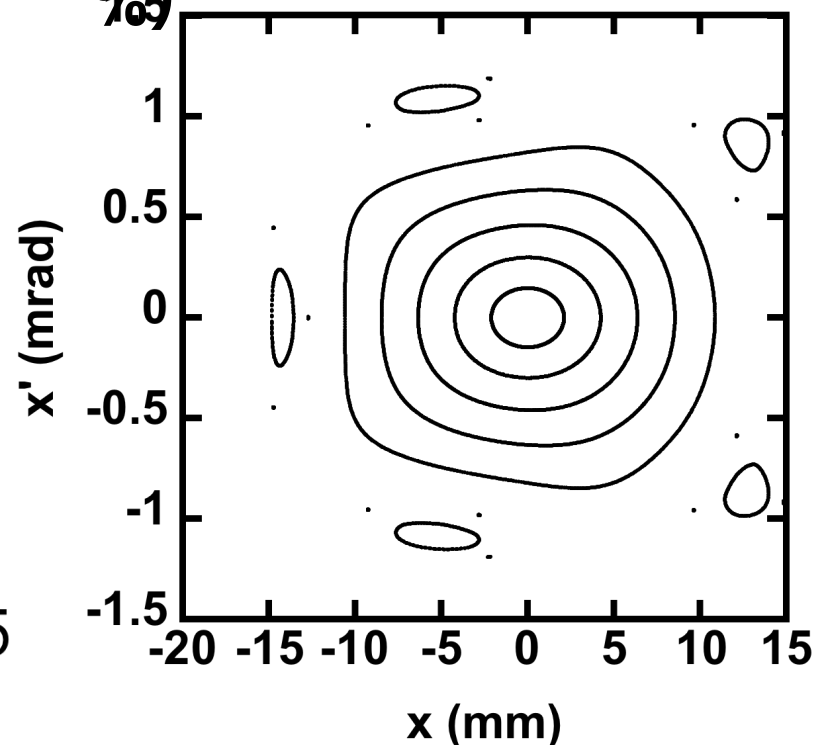
5.4. 非線形の最適化(暫定)

ダイナミックアパーチャー

@ $(\beta_x, \beta_y) = (14.4\text{m}, 1.8\text{m})$



水平位相空間のポアンカレマップ (x方向, $\delta = 0\%$)



5.5. 電磁石のパラメータ (暫定)

四極磁石

	有効長 (m)	B' (T / m)
Q1	0.30	25.5
Q2	0.60	41.6
Q3	0.35	39.9
Q4	0.40	12.3
Q5	0.40	38.8
Q6	0.35	44.0
Q7	0.80	45.8
Q8	0.50	46.1
Q9	1.00	39.5

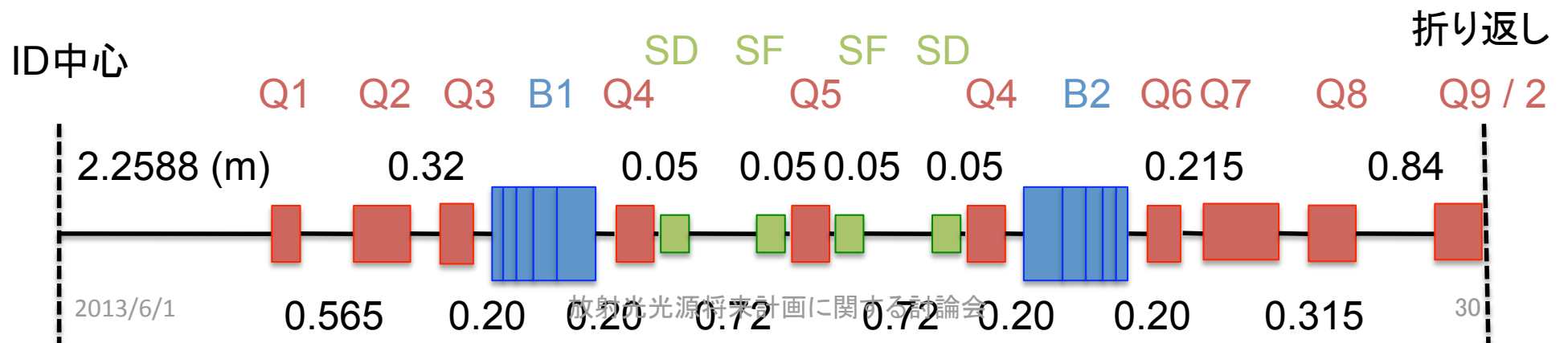
六極磁石

	有効長 (m)	B'' (T / m ²)
SF	0.30	1611
SD	0.30	841

偏向磁石

	有効長 (m)	B (T)
BP1	0.12	1.55
BP2	0.14	1.16
BP3	0.18	0.80
BP4	0.25	0.49
BP5	0.41	0.24

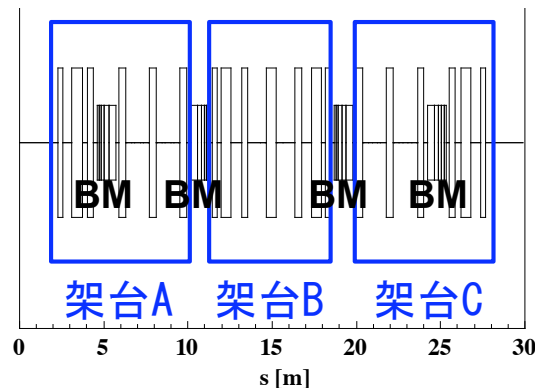
4, 6極ボア径
=40 mm
偏向電磁石
ギャップ=25 mm



5.6. 誤差感度とその抑制 (暫定)

真空チャンバーの口径(30H×16V)が狭くなる上に、誤差感度が**3倍**大きい → 感度抑制とビームチューニングの工夫が必要

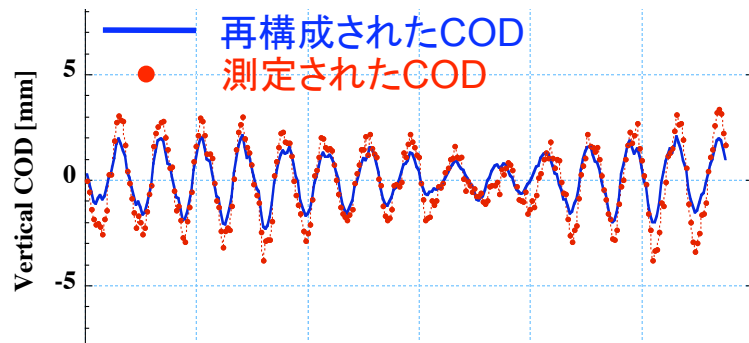
- 架台内の精密アライメントでNatural COD を抑制



架台配置は現在最適化中であるが、左図の3架台配置にてSPring-8のアライメント実績値で以下を実現

$\langle \text{COD}_x \rangle \sim 6.1 \text{ mm}$, $\langle \text{COD}_y \rangle \sim 3.1 \text{ mm}$

- SPBPMと測量データの活用でコミッショニングに対応。

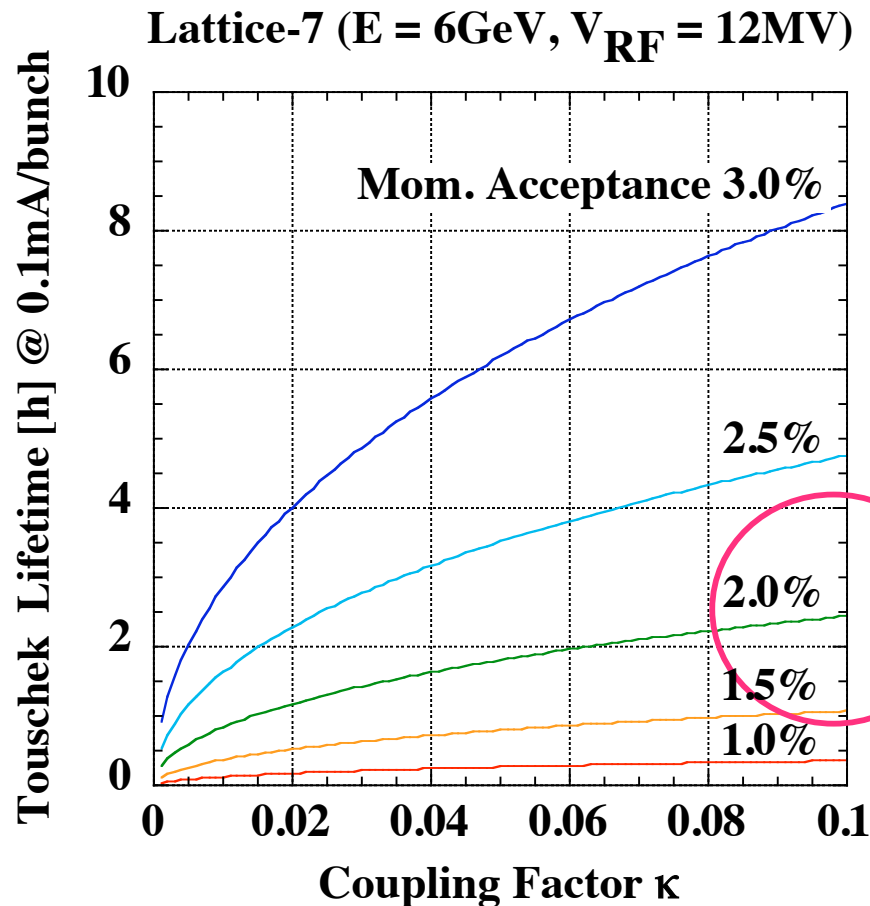


アライメントデータで初期CODの予測が数mmの精度で可能

→ 補正でチャンバー口径内に追い込む

5.7. ビーム寿命と真空度 (暫定)

Touschek 寿命 (0.1mA/バンチ)



非線形オプティクス最適化などで運動量アクセプタンスの拡大を図っていく。

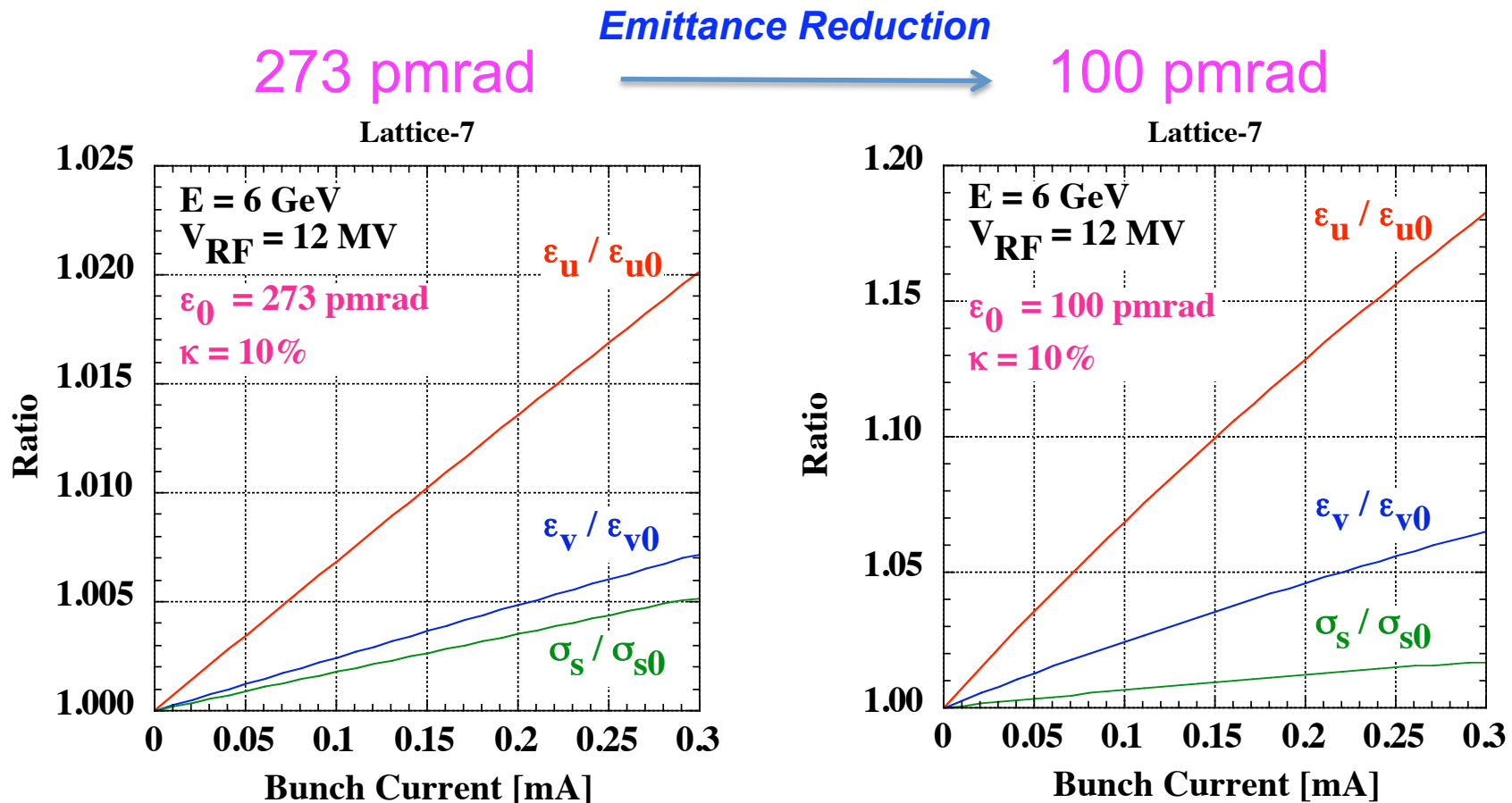
バンチ電流値 $\sim 0.1\text{mA}$
カップリング比 $\sim 10\%$
での運転を想定。

- バンチ内電子-電子散乱で決まる **Touschek 寿命**は ~ 3 時間
- バンチ伸長により ~ 10 時間

真空で決まる寿命は $30 \sim 100$ 時間程度となるよう真空系を設計。

5.8. 電子ビーム内散乱によるエミッタンスの劣化 (暫定)

"Emittance Reduction Budget" によって、さらなる低エミッタンス化 (~100pmrad) を行っても、**IBS によるエミッタンス増大は 10% 以下** (バンチ電流値 0.1mA、カップリング比 10%)。



6. 課題と今後の検討スケジュール

6.1. 課題

- 真空系、電磁石系を成立させる条件下でリングの基本性能を上げるよう基本設計を最適化
- 入射部のラティスの構築
- 入射、モニター、エミッタンス制御等、必要な機器が設置可能なスペースの確保
- 低エミッタンスの追求
- DAの8極による拡大

6.2. スケジュール

- 年度内に基本設計を完了
- 少なくとも年度内R&Dの方針決定
- 2014年夏に設計の国際レビューを予定

謝辞

本アップグレード計画に関わった理研、JASRI関係者の皆様に御礼申し上げます。特に、下崎義人、早乙女光一両博士には、加速器の現状で紹介したデータを準備頂き感謝致します。