

# PF将来計画 —光源—

— 究極の可変光源を目指して —

- 超伝導線形加速器のパラメータや運転モードの検討は、CASAの阪井さん、梅森さんにお世話になっています。
- 予算の見積もりでは、常伝導加速器本体とRF源、超伝導向けRF源についてLINACの三浦さん、松本（利）さん、超伝導向け冷凍機について仲井さんにお世話になりました。

# 目標

- 自由度の高い光源
- 何でも可変な光源
- 現在、（世界的に見ても）PF、ARでしかやっていない、特徴的な研究を発展させられる光源。
  - 超伝導垂直ウィグラーと測定器の水平展開(PF-BL14)
  - 大電荷の孤立バンチ(AR、PFハイブリッドモード)
  - タンデムアンジュレータ(PF-BL2, 16、AR-NW14) など

自由度と柔軟性があり、誤差や局所的な変化に耐性があり、  
調整に伴う多少の性能変化が「もったいなくない」蓄積リング

+

平均大電流、極低エミッタンス、極短バンチの長パルス超伝導加速器を  
通常のトップアップ入射用と入射ビームシングルパス利用の両方で利用

↓

ハイブリッドリング

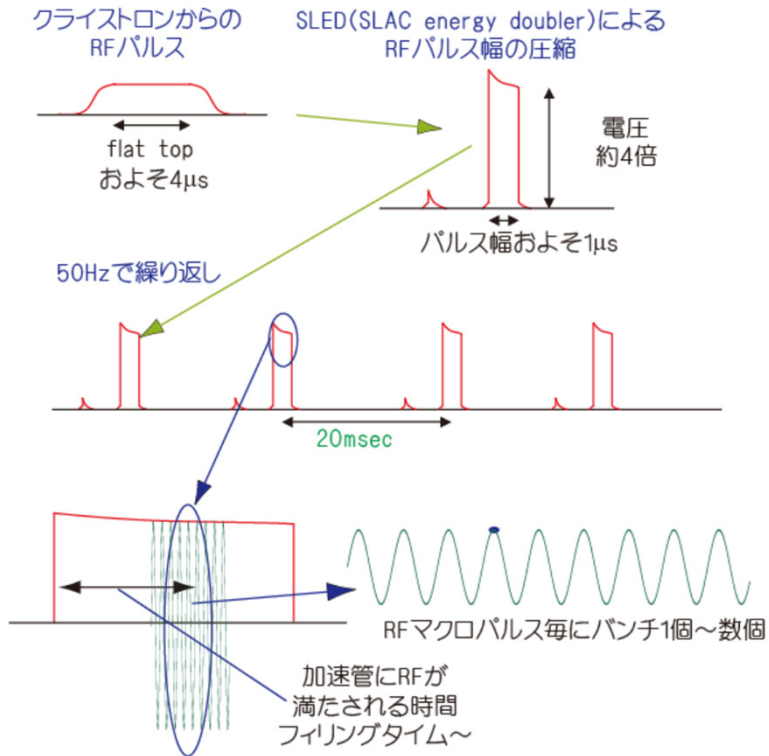
= EuroXFEL LINACの3GeV部分 + タフな第3世代的光源

# 現在の加速器光源の典型的パラメータ

- 蓄積リング
  - 第3世代： $\epsilon_x \sim 1\text{nm}\cdot\text{rad}$ 、 $\epsilon_y \sim 10\text{pm}\cdot\text{rad}$ 、 $I \sim 100\text{mA}$ 
    - 大電荷孤立バンチ、タンデムアンジュレータなど多様な実験が可能
  - 第4世代： $\epsilon_x \sim 0.1\text{nm}\cdot\text{rad}$ 、 $\epsilon_y \sim 10\text{pm}\cdot\text{rad}$ 、 $I \sim 100\text{mA}$ 
    - 極低エミッタンスを活かす以外はほぼできない（もったいない、を含む）
- 線形加速器
  - 常伝導SASE FEL： $C \sim 1\text{nC}$ 、 $f \sim 10\text{Hz}$ 、 $I_{\text{ave}} \sim 10\text{nA}$  SACLA、LCLS、PAL、Swiss、Fermi、……
    - $\epsilon_{nx} \sim \epsilon_{ny} \sim 1\text{mm}\cdot\text{rad}$ 、 $\sigma_E \sim 0.1\%$ 、 $\sigma_l \sim 50\text{fs}$
    - 1秒間に10回、 $1\mu\text{s}$ 間だけRFをON、1バンチを加速。RF ON  $10\mu\text{s}/1\text{s} \sim \text{duty } 10^{-5}$
    - 熱負荷大きく、繰り返しやパルス長を増やすことは困難。**
    - SASE増幅で光束自体は $10^6 \sim 10^7$ 倍、3GeV、500mAクラスの蓄積リングと同等。バンド幅広く、ジッター大きいがシード技術で安定性は改善する。
  - 長パルス超伝導FEL**： $C \sim 1\text{nC}$ 、 $f \sim 10\text{Hz}$ 、 $I_{\text{ave}} \sim 10\mu\text{A}$  EuroXFEL、FLASH、SHINE、(ILC)
    - 1秒間に10回、 $1\text{ms}$ 間RFをON。マクロパルス幅が長く、マルチバンチ(例えば1000バンチ)にできる。 $10\text{ms}/1\text{s} \sim \text{duty } 1\%$ 、**RFによる熱負荷はほぼなし。**(熱流入などによる負荷のみ。)
    - ILC用最高性能適用可能。冷凍機を含めた**運転経費、建設費は常伝導とそれほど変わらない。**
    - バンチ数以外は常伝導と同じ。バンチ数増大の分だけ光束も増大。平均光束リングの1000倍！
    - マクロパルス内での自由度のみ。**
  - CW-FEL
    - 加速器内に常にRF ON、連続ビーム出力可能。
    - mAの平均電流も(そう設計すれば)できるが、電力消費と放射線が問題。  
( $3\text{GeV} \times 10\text{mA} = 30\text{MW}$ )
    - LCLS IIはパルス間隔を等間隔にする**ことを目的としてCW化。
    - CW向け最適化(加速勾配を下げる+HOM対策)必要。長さ長くなり、高くなる。
    - duty 100%なので、**RFの熱負荷が長パルス(1%)の数十倍、冷凍機容量も数十倍必要。**(熱負荷は加速勾配に依る。) 加速器として安定性は向上。**建設費、運転経費も常伝導の数十倍に。**

# LINACパルス構造の比較

## (a) 常伝導LINAC(KEK入射器)



- 銅製、抵抗大、RF熱負荷大
- 1 $\mu$ sパルスに1バンチ

## (c) CW超伝導LINAC (LCLS II、ERL)

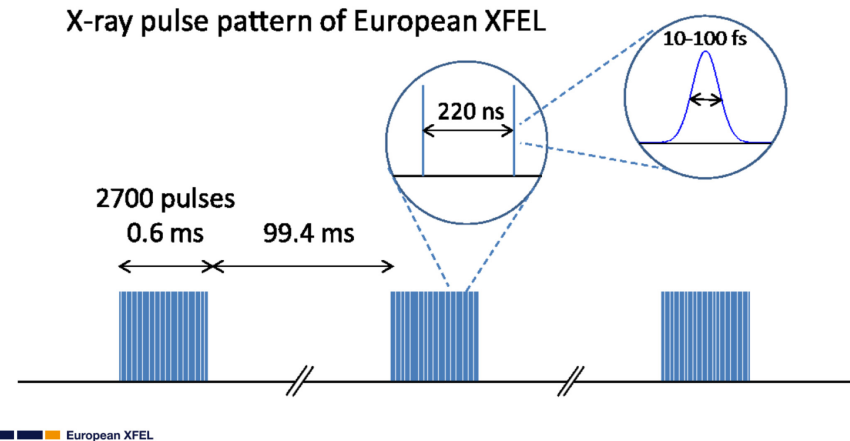
- CW化のためには、加速勾配を下げ、HOM対策を行う必要がある。モジュール数増えて長さも長くなる。
- ハードウェア、電源、結合定数等がCWと長パルスとは大きく異なる。
- RF常にONで熱負荷大きい。
- 冷凍機容量大きく、電気代も高い。ただし非常に安定。
- 本当の連続パルスビーム、等間隔パルスビーム、超大電流が可能。

## (b) 長パルス(duty 1%)超伝導LINAC (EuroXFEL)

### Time structure of European XFEL

Anders Madsen, European XFEL

7



- ニオブ超伝導（第2種）状態、抵抗有限
- RFほとんどOFFなので、RFの熱負荷はほぼなし。
- 熱流入等の負荷のみ。冷凍機容量、電気代とも極めて小さくてよい。(3GeVで今のcERL並。)
- 1msパルスに2700個 (0.6ms)バンチトレイン
- この1ms内では自由に構成できる。

# 長期将来計画の目標と長パルス超伝導加速器の利点

- 現実的な大きさのリングでは、以下は不可能：
  - バンチ長を大きく変化、1ps以下の短バンチ
  - エミッタンスを大きく変化、10pm·rad以下の極小エミッタンス
  - パルス間隔を自由自在に変化

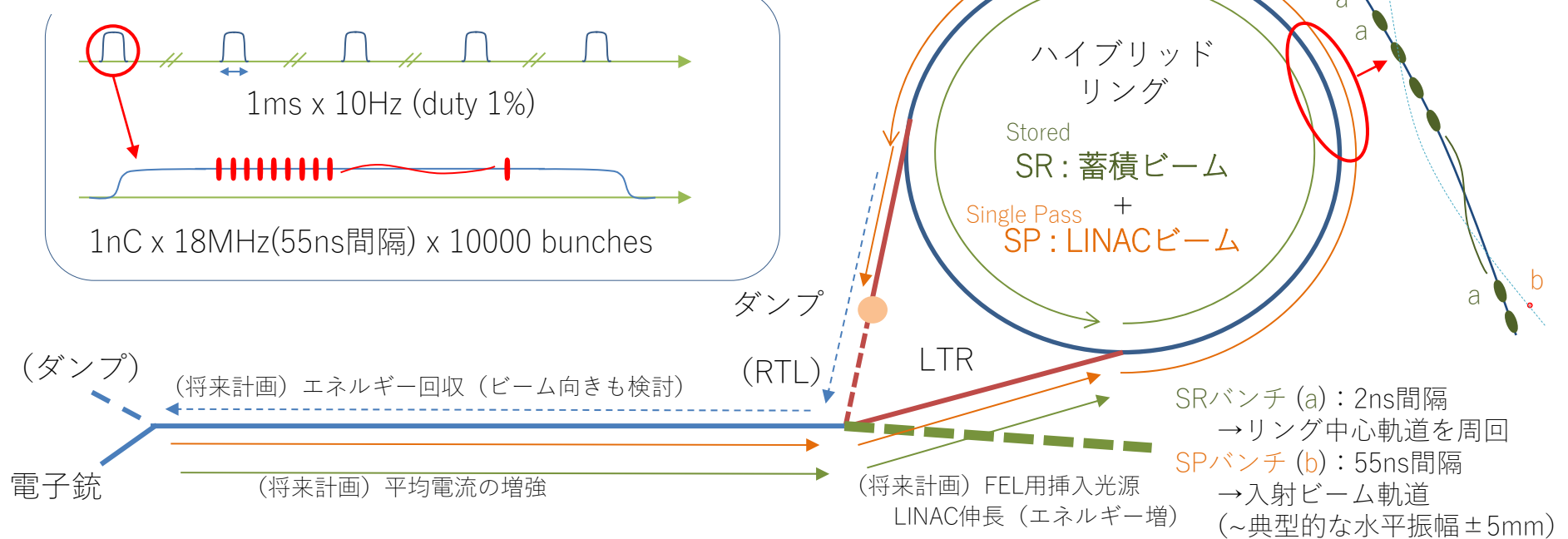
→ LINACを使えば、自由度は格段に向上し、これらの限界を突破できる。
- EuroXFELで実用化された、長パルスの超伝導線形加速器：
  - EuroXFEでは**1nC** x 2700バンチ (4.5MHz, 220ns間隔) x 10Hz = **平均27μA**、加速勾配24MV/m (向上中)、エミッタンス**0.5nm·rad** (規格化エミッタンス3mmrad)、パルス幅**50fs**で実際に運転中。
- 我々の最初の目標
  - 加速勾配30MV/m (最大35MV/m)、マクロパルス幅1ms、10Hzでduty 1%
  - バンチ電荷**1nC** x 10000バンチ x 10Hz ~ **平均0.1mA**、エミッタンス**0.1nmrad**、パルス幅**50fs**  
(ただし、先ずは全てを同時に達成しなくてもよいとする。それぞれの最優先モードとする。)
- CW運転でduty 100%とすると、加速勾配を下げる必要があり、HOM対策を手厚く行う必要がある。また、必要な冷凍機容量が数十倍となる。(建設費、運転経費とも。)
- 3GeVの主加速管の部分(電源、超伝導は冷凍機込み)で
  - 常伝導 典型的平均電流 1nA
  - 長パルス超伝導 0.1mA** コストは常伝導の1.5倍、施設全体としては1割弱増
  - CWだと 10~100mA コストは常伝導の10~100倍
  - CWモードの大電流は、電力やダンプが保たないのでエネルギー回収が必要。なお、LCLS IIでは平均電流の増強ではなく、時間構造を均一にするためにCWモードを使う。  
(LCLS IIは加速勾配16MV/m、平均電流62μA)
- コストと性能のバランスから、長パルスの超伝導加速器が最も優れている。
- LINAC運転経費が現状とほぼ変わらず、少しの予算増で10000倍の平均電流が手に入るなら、それを使わない手はないだろう。

# 平均電流の大きい超伝導LINACへの課題

- 参考：周長300m、RF 500MHzの場合、バンチ数は500個。電流500mAの場合のバンチ電荷は1nC ( $1\text{nC} \times 500\text{MHz} = 500\text{mA}$ )、蓄積されている全電荷は、 $1\text{nC} \times 500\text{個} = 500\text{nC}$ 。
- リングの場合は繰り返しで電流値を稼いでいる。
- 大強度ビームに対する安全性の確保
  - 3GeVで0.1mAはパワー300kWとなる。シングルパスビームを受ける300kWのビームダンプが必要。
  - ハードウェア的な不具合などによるビームロスが生じると、パワー的にも放射線的にも大きな問題となる。
    - FELと異なり、リング実験ホールほぼ全体が危険区域となる。
    - 遮蔽を増強して安全を担保すると莫大なコストがかかる。
    - リング、BTに存在する電荷量は少ないので、ビーム損失を即座に検知して停止できれば問題はない。高速かつ信頼できるインターロックシステムが安全設計、計画実現に向けたスタディでの最重要項目となる。
- マクロパルスに1nCを10000バンチ入れると、10000nCなので、10Hzのうちの1Hz分をロスしただけで、リングの全ビームダンプ20回分に相当する。
- ただし、瞬時に全電荷がビームライン上に存在するわけではない。55ns~16.5m間隔。大きめに見積もってLINAC+BT 300m、リング600mとしても、約50バンチでリングの1/10の電荷になる。異常を発見し、BTの途中で即時に止められれば、リング（実験ホール）の安全性は確保できる。
- 超伝導加速器の安定的量産と高圧ガス対策の難しさ
  - 日本では日本の高圧ガス対応の空洞を量産した経験はない。（本計画には空洞96本、クライオモジュール12台が必要。）
  - 超伝導空洞は非常に繊細な装置で、経年劣化（真空の汚れ等）に弱く、それを回復した例もない。（KEKBの単セル空洞は長期安定運用の経験あり……）
- 今後、大強度ビームの安全性の確保と、超伝導空洞技術の商用実用化へ向けてのスタディを行ってゆく必要がある。

# ハイブリッドリングの構成

典型的なRFマクロパルスとバンチ構造



- 蓄積リング : 300~600m、3GeV (SX用小リングとHX用大リングの2リング構成もあり?)
  - 入射器 (EuroXFEL同様、ILC技術を使った長パルス超伝導線形加速器)
    - 加速勾配30MV/m、リングへのトップアップ入射、SPバンチ、ゆくゆくはFELにも利用
  - SRモードのビーム : 電流~500mA、水平エミッタンス1nm·rad、バンチ長10ps
  - LINACからのSP(シングルパス)ビーム : 平均電流~0.1mA、100pm·rad、50fs
  - SRのみ、SPのみ、SR+SPでHB (ハイブリッド) モードの3モードで運転。
  - HB : SR/SPビームは軌道スイッチングで切り替え、もしくは別の光軸で同時利用可能
- SPモードの最高性能は必ずしも全て同時ではない。

※現在のEuroXFEL : 1nC x 2700バンチ(4.5MHz, 220ns間隔) x 10Hz = 平均27μA、バンチ長50fs、500pm·rad、加速勾配24MV/m (向上中)

# ビームダイナミクスの課題

- 極短バンチ、極低エミッタンスバンチを維持したまま輸送することは簡単ではない。
  - **空間電荷効果**：バンチ内の電子間クーロン力
  - バンチ長と光の波長が同程度になった時、放射光はコヒーレントになる。コヒーレント放射光 (CSR) のパワーは電子数の二乗に比例（通常の放射光は電子数自体に比例）するようになり、大強度になる。バンチ長50fs~15 $\mu\text{m}$ ~0.08eVくらい。
  - **コヒーレント放射光の効果**：バンチ後方から強力な放射光が発生、後方の電子は大きくエネルギーロス。電子が弧の軌道を描く間に、光は弦でショートカットしてバンチ前方に追いつき、バンチの前方の電子を加速。バンチ内にエネルギー偏差が発生。エネルギー差は分散関数とそれに伴う軌道長の差を通じ、バンチ全体としてエミッタンス増大、バンチ伸長となる。

- 空間電荷はまだだが、CSR対策についてはある程度検討を進めている。

## CSR対策

- CSRそのものの抑制：光が弦を描いて追いつかなければいい。

- ダクトを細く
  - 弦が張れない細さに。
  - カットオフより細くすればそもそも出ないが、水平なので入射できなくなる。
- 曲率半径を大きく
  - 弦と弧で長さの差がなくなる。届きにくくなる。
- 偏向電磁石を短く
  - 有意に軌道長差ができない長さに。

- 効果の抑制：エネルギー偏差が $\epsilon$ にも $\sigma_z$ にも効かなければいい。

- 運動量偏差に対する位置偏差（分散関数）を小さく
- 運動量偏差に対する軌道長偏差 $\Delta z$ を小さく  
 ~分散小さく + 曲率半径大きく

$$\Delta z = R_{56} \frac{\Delta p}{p} = - \int_{BM} \frac{\eta}{\rho} ds \frac{\Delta p}{p} = -C\alpha \frac{\Delta p}{p}$$

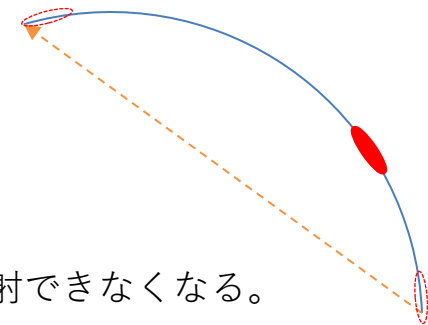
$\rho$ : ベンドの曲率半径

$\eta$ : 分散関数

$C$ : 周長

$\alpha$ : momentum compaction

- 分散小さく + 曲率半径大きく = 低エミッタンスリングの設計指針と同じ





# 目標パラメータ

---

- 500mA, 1 nm·radの通常の蓄積モードは保証。それに加えて……
- LINACビーム利用モードとして、
  - (a) 低エミッタンスモード: 100 pm·rad, 1 ps, ave 100  $\mu\text{A}^{*1}$  → 目標 **30 pm·rad**
  - (b) ショートバンチモード: 100 pm·rad, **50 fs<sup>\*2</sup>**, ave 100  $\mu\text{A}^{*1}$
  - (c) シングルバンチモード: 100 pm·rad, 50 fs<sup>\*2</sup>, **1 nC**
- <sup>\*1</sup> 10,000shot x 10Hz x 1nC のバースト運転。
  - <sup>\*2</sup> バンチ長は輸送距離によって変わる。(輸送に従いバンチ伸長が起こる。)
    - 初期規格化エミッタンスとして a)  $0.2\pi$ , b,c)  $0.5\pi$  mm·rad を想定。
    - 各モードにおいては**太字**の性能を重視、他は多少の変動を許す。
- CSR、空間電荷効果でエミッタンス増大、バンチ伸長が起こる。
  - 電荷を下げれば抑制できる。
- 当初：100 pm·rad, 50 fs, 1 nC (同時達成できない場合は目標パラメータ以外を調整)
- くどいようだがEuroXFELのLINACでは、直線で、500 pm·rad, 50fs, 1nC x 2700バンチ, 27  $\mu\text{A}$  は達成済。

# HB時、何ができるか？

---

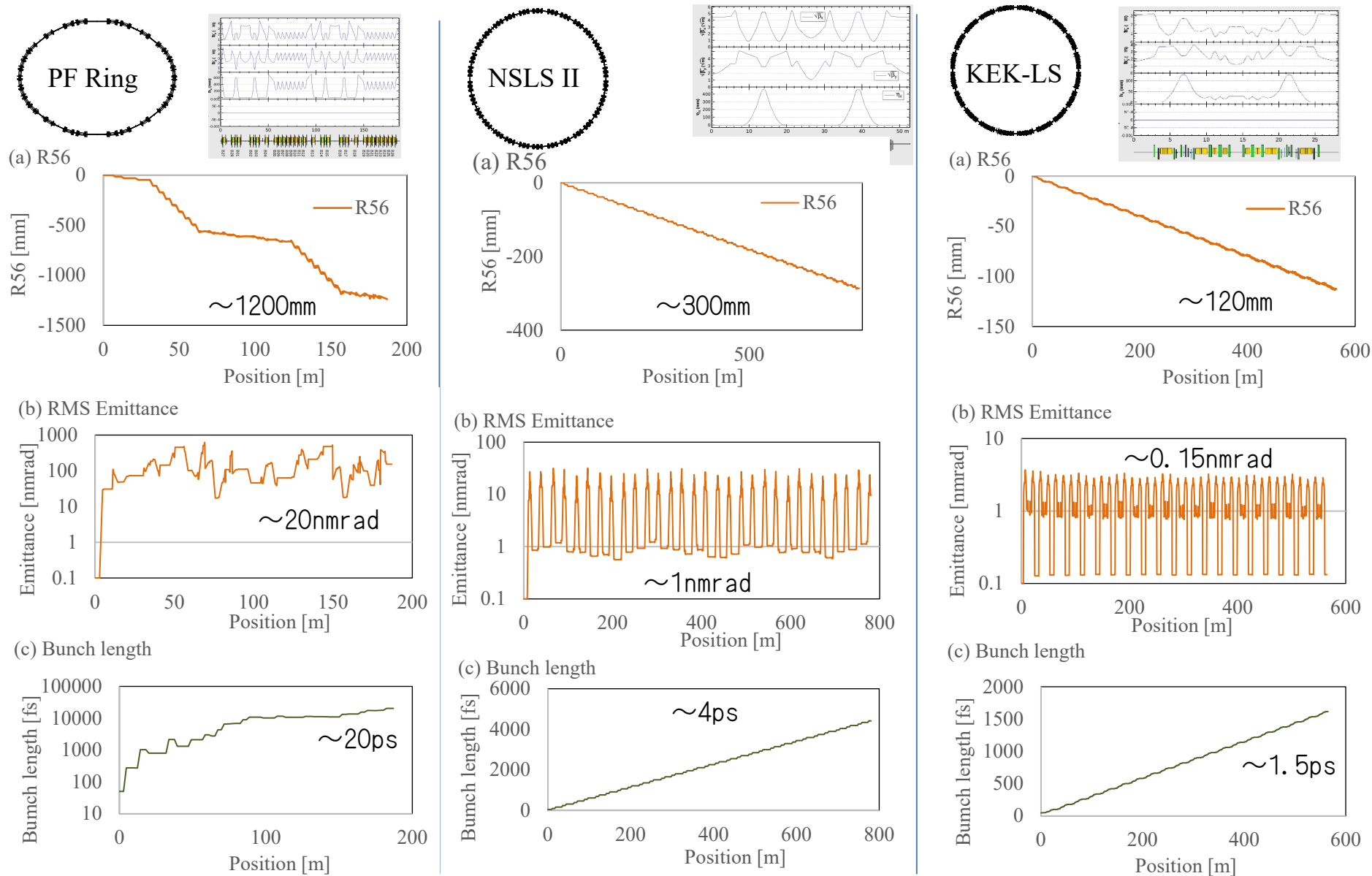
- 入射、蓄積ビームともサイズが十分小さく、入射器も安定、入射点の設計もきちんとなされているれば、入射ビームの振幅はセプタム厚さ+ビームサイズの5~6mmまで小さくできる。（これを大きくすると、より強いバンプ磁石が必要になる。）
- SPビーム = 入射ビーム
  - 入射ビームは1バンチ、SPビームはマクロパルス長1ms内に多バンチ。
  - キッカーバンプのパルス幅が異なる。（SP用はDCでよい。）
- SP、SRモードの選択
  - 中心軌道上に来るビームをSRにするかSPにするか、選択可能。  
（高さ5mm程度の局所DCバンプ。入射点と直線部の $\beta$ にもよる。）
- タンデム（同じ直線部に2台の）アンジュレータでのそれぞれ利用
  - 上下流のアンジュレータで、それぞれSR、SPを選べる。  
（それぞれのIDに対して局所DCバンプ。）
- 直線部5mで振幅5mm~1mrad違う光軸で、2光を同時利用。光軸はそれぞれ調整（多極磁場をステアリングとして利用）。
- 孤立バンチ（バンチギャップあり）に対して、SPは時間と構造を任意に選べる。（全BL巻き込む。）

# 輸送路とCSRの効果から見た典型的なラティス

---

- リングラティスを検討するために、短バンチ、低エミッタンスを維持できるラティスを探索する。
- PF/AR：FODOセル+色消し直線部構造のラティス。偏向電磁石の磁場は強く、1台あたりの曲げ角も大きい。 $R_{56}$ も大きい。
  - CSR航跡場自体が大きく、航跡場によるエネルギー偏差の影響も大きい。
  - ほとんど最初のBMだけでエミッタンス10nmrad、バンチ長10psまで速やかに増大。CSRの効果も $R_{56}$ の効果も共に大きい。性能的に全く選択肢にならない。
- NSLS II/SPRING 8的参考ラティス：DBAセルのラティス。8GeVは曲率半径が大きく、NSLS IIは意図的に偏向電磁石を弱くしてある。 $R_{56}$ も小さい。
  - 第1、2世代旧リングとHMBAの中間に位置する。
  - **NSLS IIをベースに改良するのが良さそう。**
- KEK-LS：HMBA構造のラティス。磁場弱く、1台あたりの曲げ角も小さい。分散関数も小さく、進行方向勾配ベンドで分散の効果も抑制。
  - $R_{56}$ はPF/ARの場合の1/10以下に抑えられている。
  - CSRの効果自体も小さく、バンチ内エネルギー偏差の与える影響も小さく抑えられる。
  - 3GeV ERL周回部と比較可能な程度のバンチ長（~3ps）に留まる。エミッタンスはこちらの方が小さく抑えられる。
  - 極低エミッタンス維持したまま $R_{56} \sim 0$ にするのは難しそう。（結局1nmrad以上になるならHMBAを採用する理由はない。可変にして別モードという解はありかも知れない。）
- 高性能な第3世代か、HMBAと同じような指針でラティスを作ると良さそう。

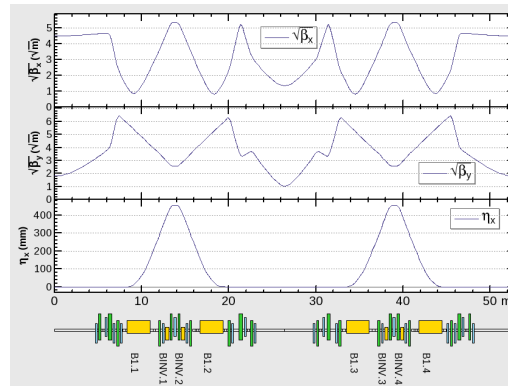
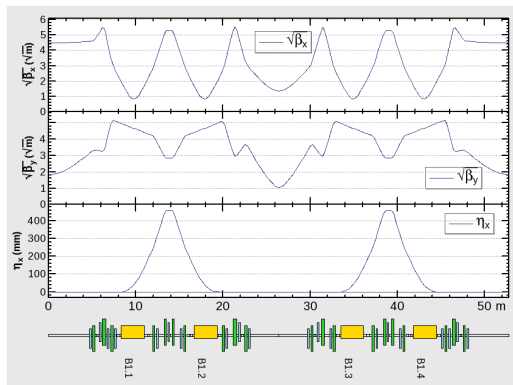
# 典型的なラティスの応答



初期値：リングの軌道上から、 $C = 1$  nC、 $\sigma_t = 50$  fs、 $\sigma_E = 0.5\%$ 、 $\epsilon_x = \epsilon_y = 100$  pmrad

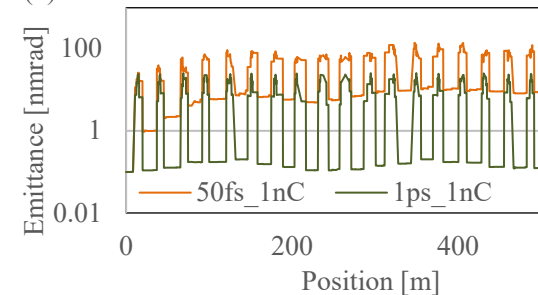
# NSLS IIをもとにしたリングの設計例

- リング全体として $R_{56}$ ~モーメントムコンパクション $\alpha$ はゼロにたくない。
- 原理的には $\alpha=0$ なら蓄積ビームのバンチ長もゼロ。
  - 実際は高次の効果や不安定性で伸びる。
  - そもそもマイクロバンチ不安定性で蓄積できない。
- SPが通る部分とそうでない部分で、ラティスを変更。
  - SPが通る部分は $R_{56} \sim 0$ 。CSRの効果によるバンチ伸長と同程度の効果の $R_{56}$ は残しても良い。厳密に高次までゼロにする必要はない。
  - SPが通らない部分で $R_{56}$ を有限にする。蓄積リングとしてのRF空洞、高調波空洞もSRのみ側に設置。

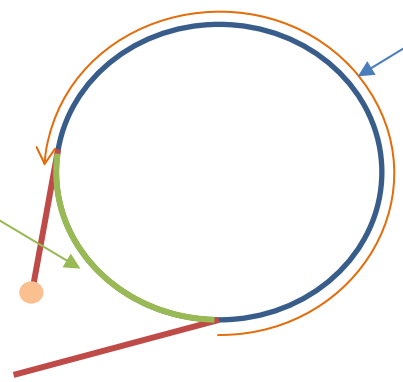


バンチ長1psにすれば、  
100pmrad維持可能。

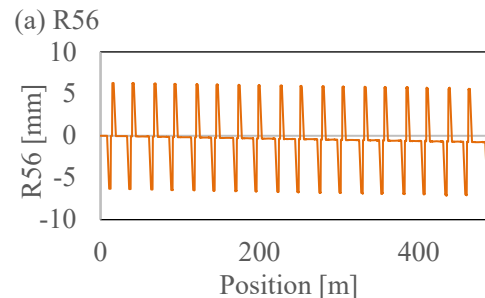
(b) RMS Emittance



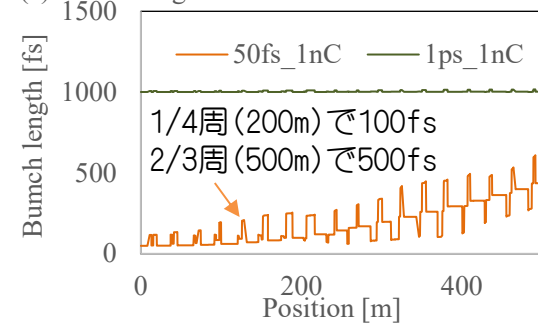
もとのラティス



逆ベンドを追加して $R_{56} \sim 0$   
(曲げ角の和は調整)



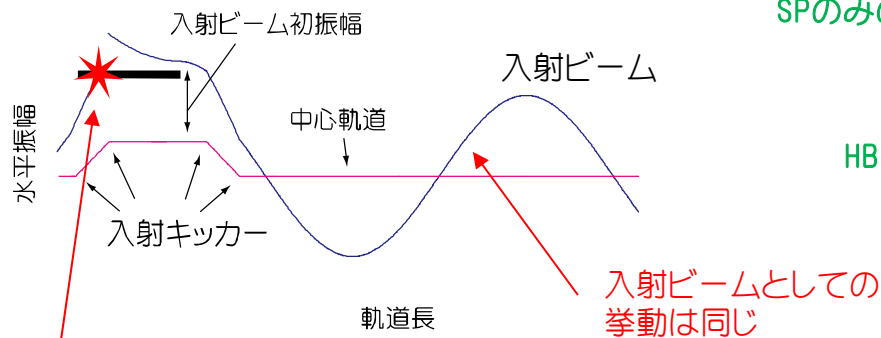
(c) Bunch length



## 2ビームを同時に回すということ

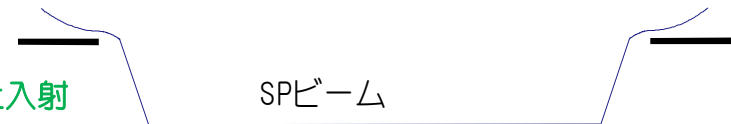
- 現在も入射時は蓄積ビームと入射ビームとが別の軌道で同時に周回している。
- 現在のPF入射
  - 1Hz x 0.1nC x 1バンチ
  - 入射後、大振幅で振動、バラバラに散りながら放射減衰で振動減衰、蓄積ビームと混ざる。
  - 入射時だけ蓄積ビームをパルスの的に移動させる必要がある。(パルスバンプ必須。バンプを立てたままだと周回してきた入射ビームがセプタム内壁に内側から衝突して損失する為。)
- SP/HBモード
  - 10Hz x 1nC x 10000バンチ
  - SR: 500mA蓄積ビーム、トップアップ入射は1Hz x 0.1nC x 1バンチなど。
  - SP: 中心軌道に入射、リングを輸送路的に利用。リング一部分通過後、出射、ダンプ。
  - HB: 蓄積ビーム存在下で、SPビームを入射軌道に入射、リング一部分通過後、出射、ダンプ。
  - SPビームは2周以上しないので、パルスバンプは不要。全てDC (蓄積ビームのバンプをDC的に立てたまま) でよい。セプタムをパルスにする場合は、1ms以上のフラットトップを持ち、10Hzで打てるセプタムが必要。

### 通常入射時のパルスバンプの必要性

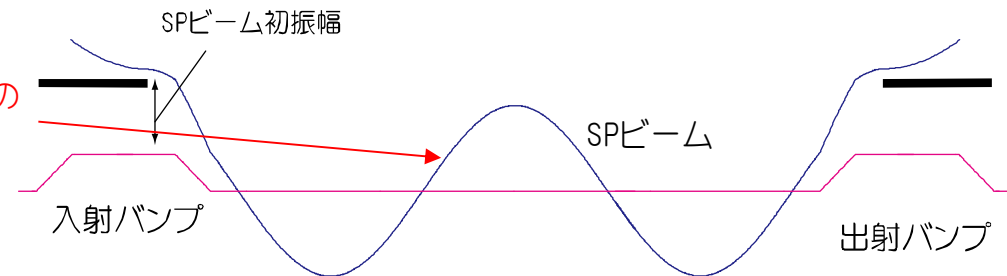


バンプを下げないと戻ってきた時に当たってなくなる。

### SPのみの場合の軸上入射



### HB(蓄積ビームあり)モードのSPビーム入出射



## 2ビームを独立に制御するために

---

- 偏向電磁石を使うと、蓄積ビーム、入射ビーム共に同じ蹴りを与えてしまう。
  - SR/SPどちらかのビームしか使わない場合はこれで問題はない。
- 両方同時に使いたい場合、蓄積ビーム軌道と入射ビーム軌道を独立に調整する必要がある。
  - 蓄積ビーム：偏向電磁石（通常のスティアリング）
  - 入射ビーム：多極電磁石（4極、6極……）、中心磁場ゼロで振幅のある場所で磁場あり。
    - 4極を振ればオプティクスやチューンが変わる。
    - 6極を振れば色収差、非線形が変わる、対称性が崩れてアパーチャがなくなる。
    - それぞれどこかで補正をかけるが、限度がある。自由に何mmも振れるわけではない
    - 誤差と様々な局所変化に耐えられるようなリング設計が必要。
- リングは500MHz、入射はマクロパルス内で18MHzなので、周波数差を利用すればSR/SPビームを独立に測定可能。（マクロパルス内で長パルストレインが必要。調整用のパイロットマクロパルスが必要かも知れない？）

# まとめ

---

- 柔軟性と自由度を重視し、さらに、現在PF/ARで行われている大電荷孤立（シングル）バンチや垂直ウィグラーといった特徴的な研究が継続できる新しい光源を検討している。
- 極短バンチ（50fs）や極低エミッタンス（0.1nmrad）といった先端的な運転モードと、汎用性のあるモード（500mA/1nmrad/10ps）を両立でき、かつ、先端的なモードでもある程度の平均電流（0.1mA）が確保できる、長パルス超伝導線形加速器を蓄積リングと組み合わせた光源を第1候補としている。
- 加速器本体の費用対効果を考えると、長パルスの超伝導線形加速器は常伝導加速器に比べ、冷凍機の方を考慮しても値段はほとんど変わらない。（CWにすると、非常に高額になる。）
- 大出力の線形加速器利用時、ビームロスや放射線安全対策が最大の課題で、それがこれからのスタディ最重要項目となる。
- 極短、極低エミッタンスという性能を損なわず、かつ、蓄積リングとして運転可能な輸送路の検討を行っている。
- 既存の典型的なラティスに対して典型的な高性能ビームを通過させるシミュレーションを行った結果、CSRによるバンチ伸長、エミッタンス増大を抑制するためには、曲率半径の大きい、短いベンドを利用し、分散関数を小さくすれば良いという結果になった。
- 指針としては低エミッタンスリングの設計と同じ指針なので、第3～4世代リングで $R_{56}$ をゼロに近づけた設計がよいことになる。そのようなリングで、ダイナミックアパーチャの確保、誤差や局所的なラティス改造に対する耐性を強めたものが今回の最適解となる。
- NSLS IIのラティスをベースに、具体的なラティス設計を始めたところである。
- 今後の課題
  - 高速インターロックや放射線安全関係のスタディの予算をどう確保してゆくか。
  - 空間電荷効果を含めた極端な性能のバンチに関するシミュレーションの確立。
  - LINAC部分を含めた具体的な詳細設計。