SuperKEKB加速器

2026/11/17

浅見高史 (KEK)

Mail : tasami@post.kek.jp

自己紹介

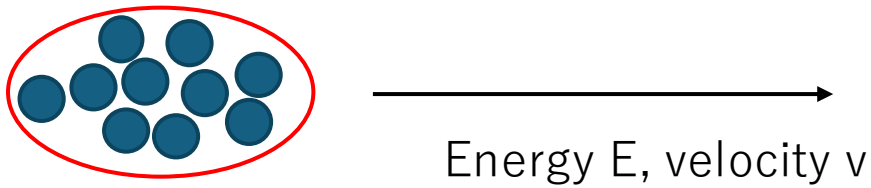
- **所属：** 高エネルギー加速器研究機構(KEK) 加速器研究施設
- **興味：** 粒子加速器におけるビーム光学・電磁石・電源等
- **略歴：**
  - 2019年 春 修士で東大小関研(加速器を専門)に所属。**J-PARC MR**で加速器研究を開始。
  - 2024年 春 ドクター取得。KEK 特別助教として、そのまま**J-PARC MR**で研究を継続。

    論文：「J-PARC MRにおける光学測定による高精度な四極磁場誤差の評価」
  - 2025年 春 KEK 助教、引き続き**J-PARC MR**に所属。
  - **2026年 5月中旬 SuperKEKBへ転属。**

粒子加速器とビーム物理

- 粒子加速器：**荷電粒子を加速し、安定に周回・蓄積または制御する装置。**
- 用途に応じた様々な加速器
  - 物理実験：SuperKEKB, J-PARC MR, RIBF, RCNP, LHC, FNAL MI, …
  - 光源加速器：Spring-8, PF, PF-AR, …
  - 医療用加速器：放射線がん治療等、様々（日本では1000 台以上）
- 「加速器の中の荷電粒子の運動の安定制御」そのものが一つの研究分野：**「ビーム物理」**

ビーム：同じ方向へ揃って運動する粒子の塊



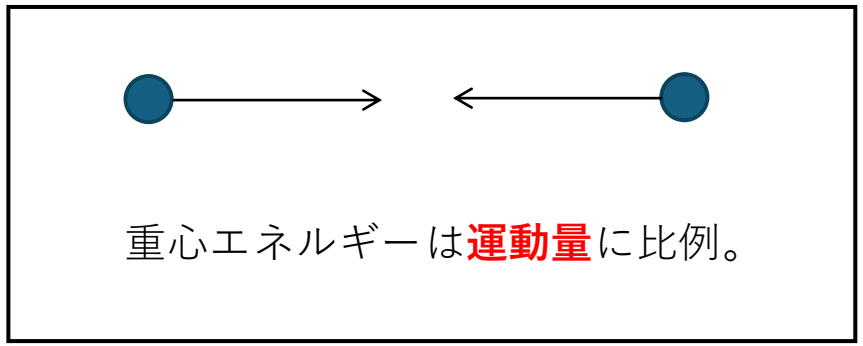
加速器の分類

目的やエネルギーに応じ様々な加速器とその分類方法。

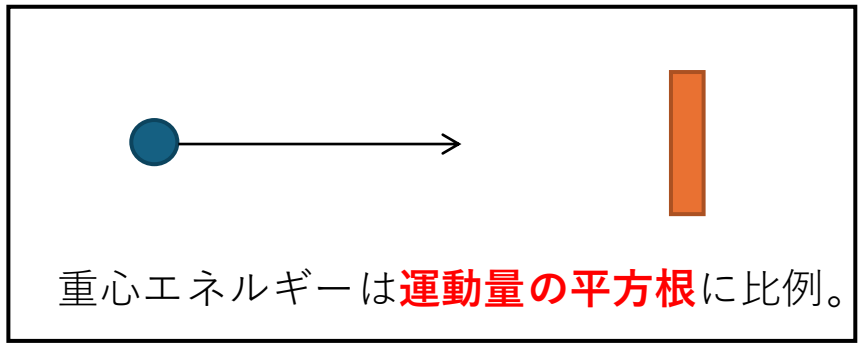
- 加速粒子：**電子**、**陽電子**、陽子、重粒子、…
- 形状：線形加速器、**円形加速器**
- 加速原理：静電加速、**高周波加速**
- ビーム衝突方式：**衝突型**、固定標的型

本講義で主題とするSuperKEKB は
「**電子・陽電子 衝突型 円形加速器**」。

衝突型（例：SuperKEKB）



固定標的型（例：J-PARC MR）



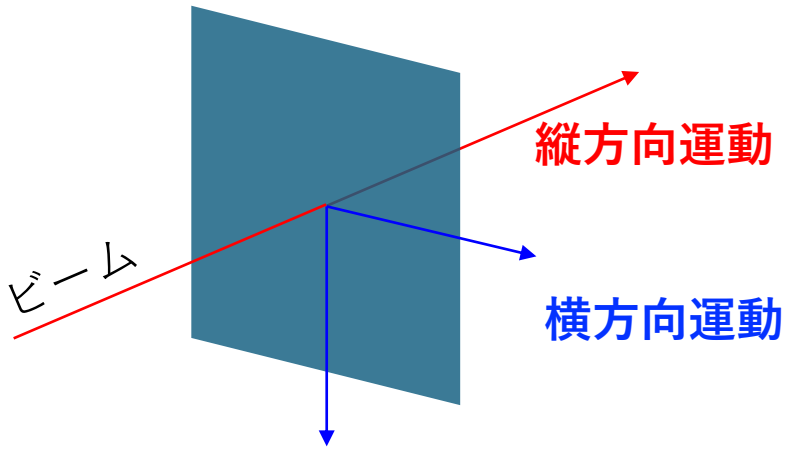
加速器を周回するビームの運動

加速器におけるビーム運動の制御

- 加速器におけるビーム運動は電磁場を用いて制御。
- 多粒子を安定に周回させるにはその精度が重要。

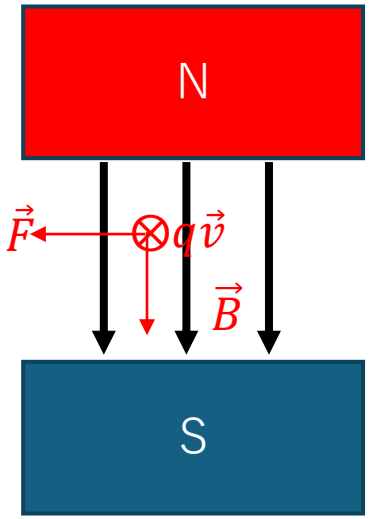
ざっくり言えば、

1. 横方向運動を**磁場**で制御。
2. 縦方向運動を**電場**で制御。

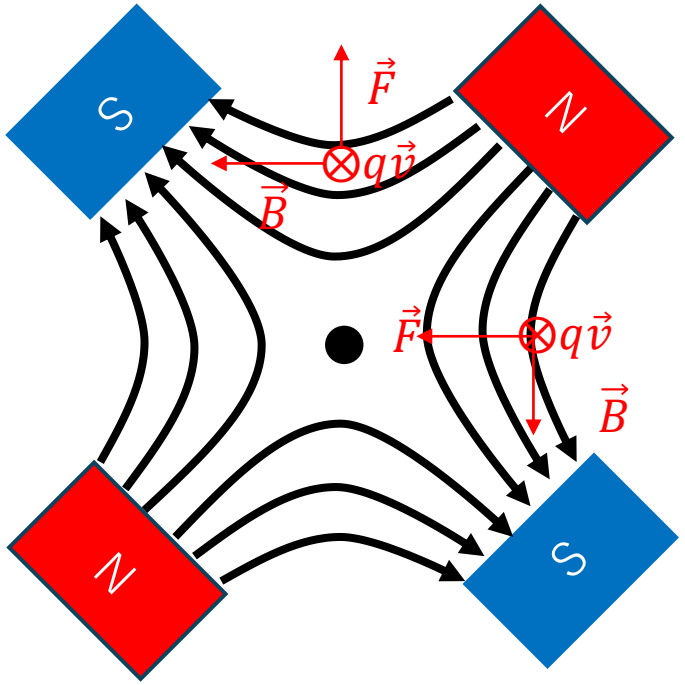


横方向運動：磁石

横方向運動は偏向電磁石や四極電磁石などの磁石を用いて制御。



偏向電磁石(軌道を曲げる)



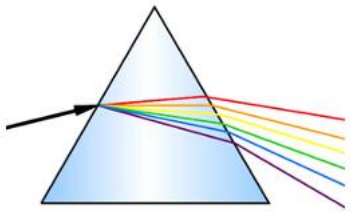
四極電磁石(収束)

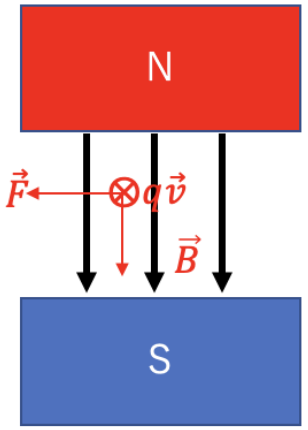
$2(n+1)$ 極磁場の強さを「**K値**」 $K_n \equiv \frac{q}{p}\frac{\partial^n B_y}{\partial x^n}L$

p:運動量　L: 磁石の有効長
q:電荷

K値の物理的意味

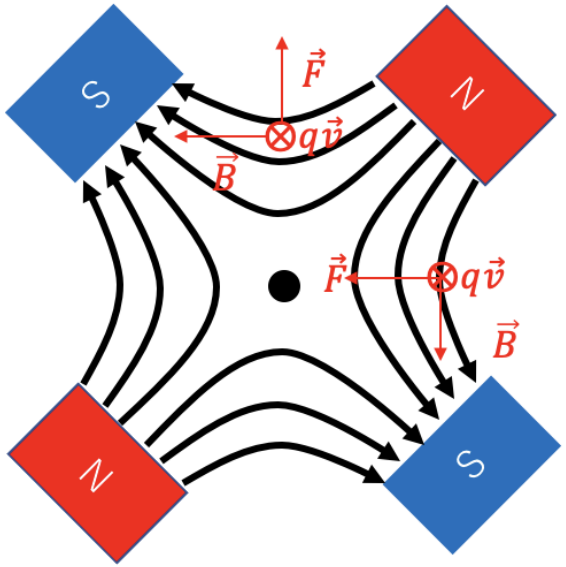
K値＝曲げ角



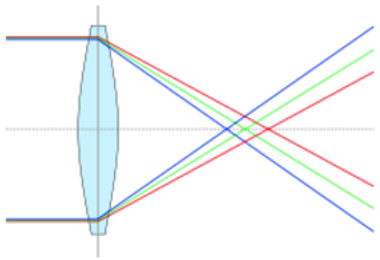


偏向電磁石

K値＝焦点距離の逆数

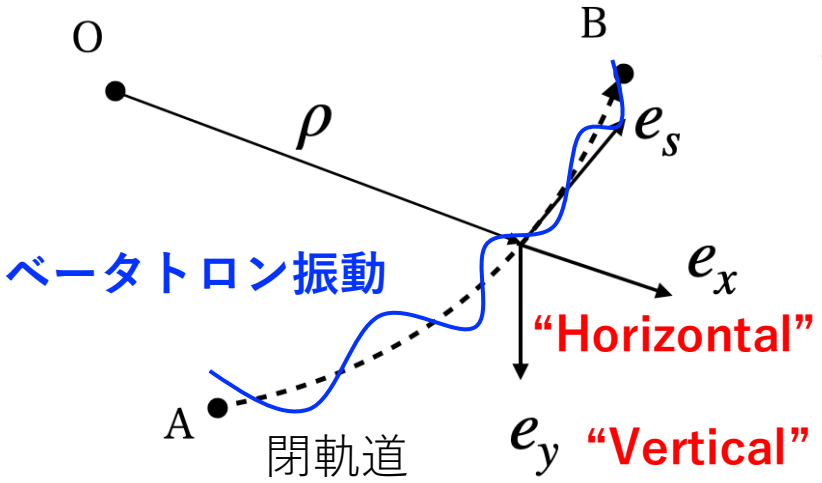


四極電磁石



光学における<u>プリズム</u>と<u>レンズ</u>に対応する。

横方向運動：ベータトロン振動



ベータトロン振動 $\chi(s) = \sqrt{\varepsilon_\chi \boldsymbol{\beta_\chi(s)}} \cos\left(\boldsymbol{\phi_\chi(s)} + \phi_{\chi 0}\right) + \chi_{CO}$

$\chi = x, y$

光学パラメータ： 四極磁場に依存

- $\boldsymbol{\beta_\chi(s)}$：ベータトロン関数
- $\boldsymbol{\phi_\chi(s)}$：ベータトロン位相
- リング1周あたりの振動回数: **チューン** ν_χ

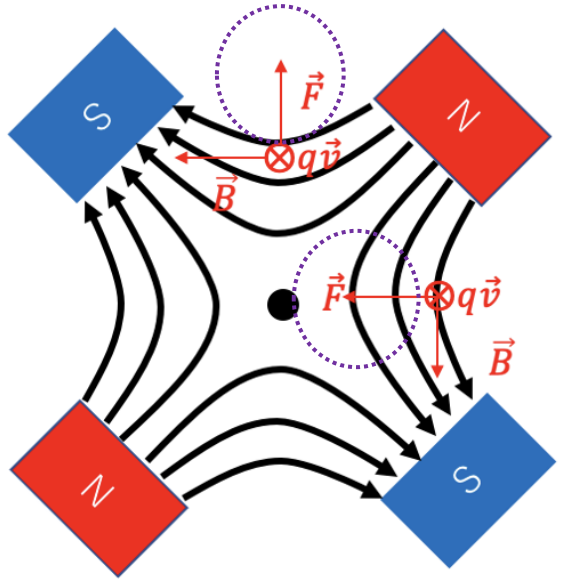
各粒子は**閉軌道** $\boldsymbol{\chi_{CO}}$の周りをベータトロン振動

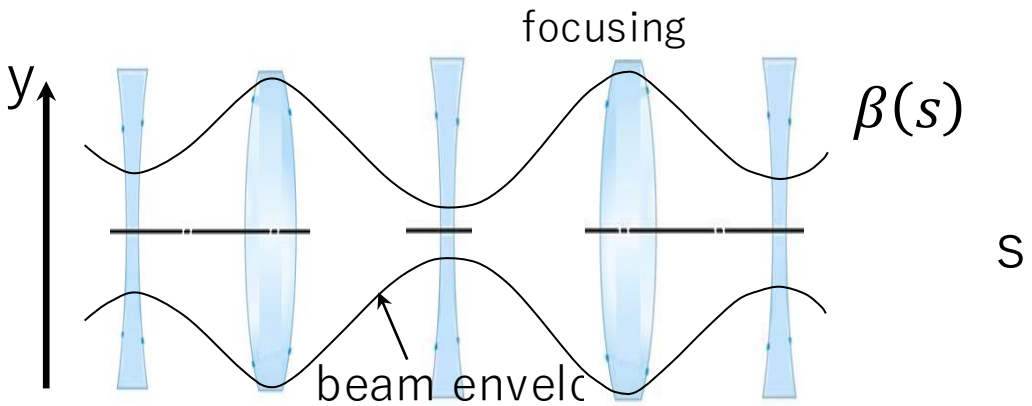
ビーム物理ではリングにおける位置sを独立変数にとる。

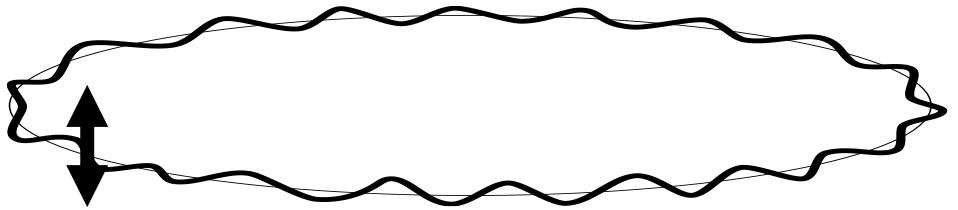
K値や各種光学パラメータを用いてビーム運動を
記述する体系を「**ビーム光学**」

強収束の原理

- 加速器における電磁石は、光学系におけるレンズと対応。
- しかし、四極電磁石は水平・垂直方向同時には収束できない。
- そこで、極性が反対の四極電磁石を並べる。そうすればビームは全体として両方向に収束する事が示せる。
- この磁石配置で、個々の粒子はベータトロン振動する。







基準軌道の周りを振動しながらリングを周回。

分散関数

ビーム構成粒子の運動量が設計通りなら、

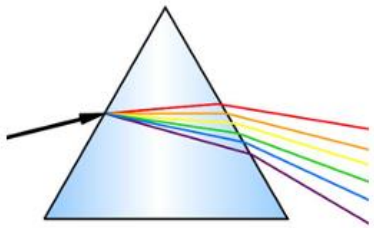
$$x(s) = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x(s)}\, cos(\phi_x(s) + \phi_{x0}) + x_{CO}$$

実際は運動量分布を持つ。

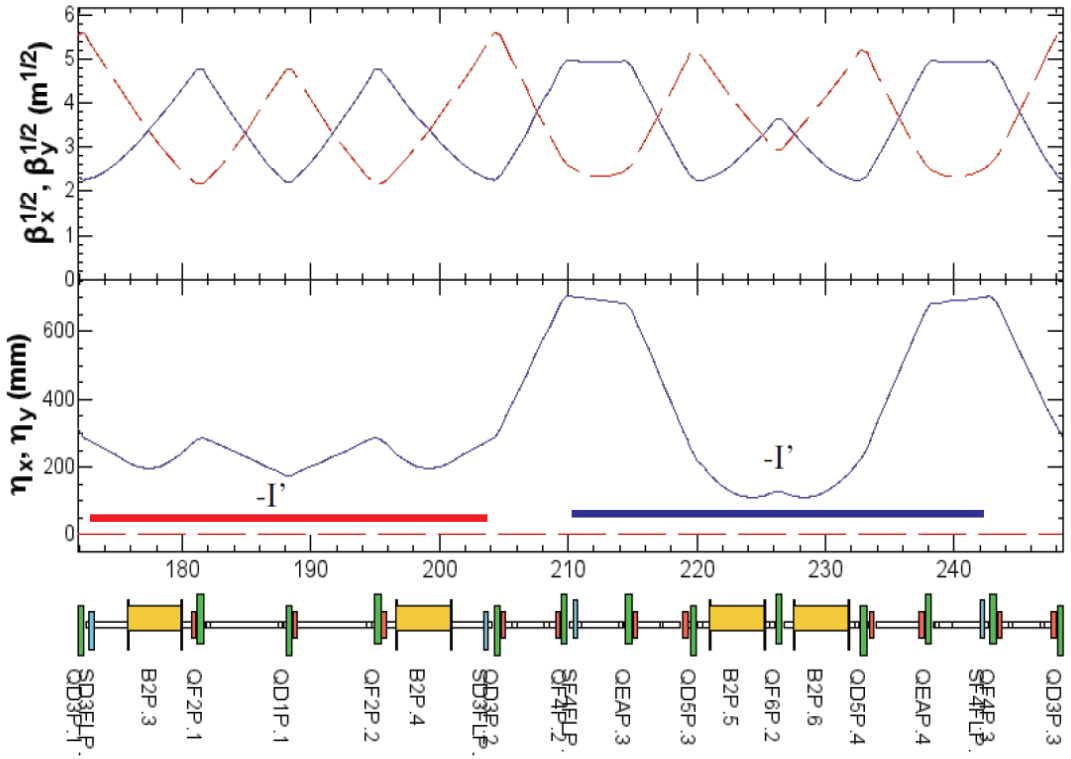
運動量が$\Delta p/p$だけずれた粒子の運動：

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x(s)}\, cos(\phi_x(s) + \phi_{x0}) + x_{CO} + \boldsymbol{\eta_x(s)} \frac{\Delta p}{p}$$

$\eta_x(s)$：分散関数



ベータトロン関数と分散関数



光学計算にはSADというツールがよく使われる。
https://acc-physics.kek.jp/SAD/

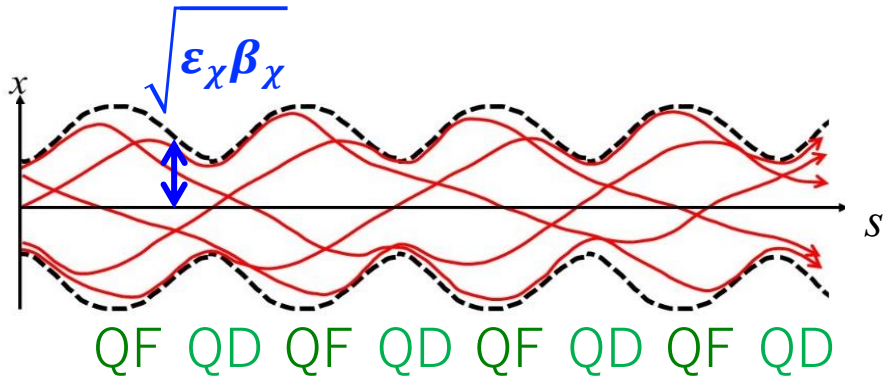
エミッタンスとビームサイズ

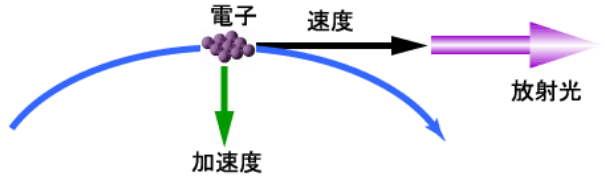
エミッタンス：ビームの粒子分布の占める位相空間面積を表す量。

- 単位：π mm mradや、 πを除してpm等など。 本講義では後者。
- SuperKEKBのような蓄積リングでは放射減衰・放射励起の釣り合いで決まる。

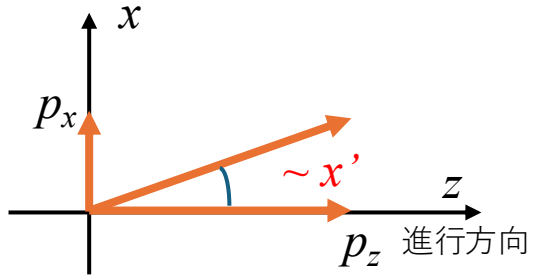
ビームサイズ： $\sigma_\chi = \sqrt{\varepsilon_\chi \beta_\chi(s) + \left(\frac{\Delta p}{p}\eta_\chi(s)\right)^2}$

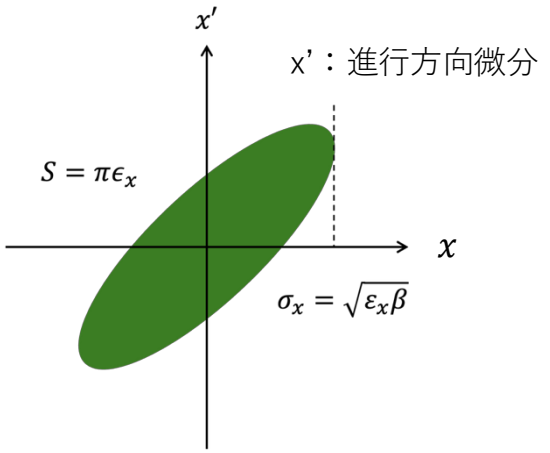
- sはリングの位置：βとηはs 依存。ϵとmomentum spread $\Delta p/p$は非依存。
- エミッタンス **小** → ビームサイズ **小**　**衝突型加速器で重要** (後述)





低エミッタンス化
- 放射光の発生（ウィグラー電磁石）
- 加速空洞によるエネルギー供給

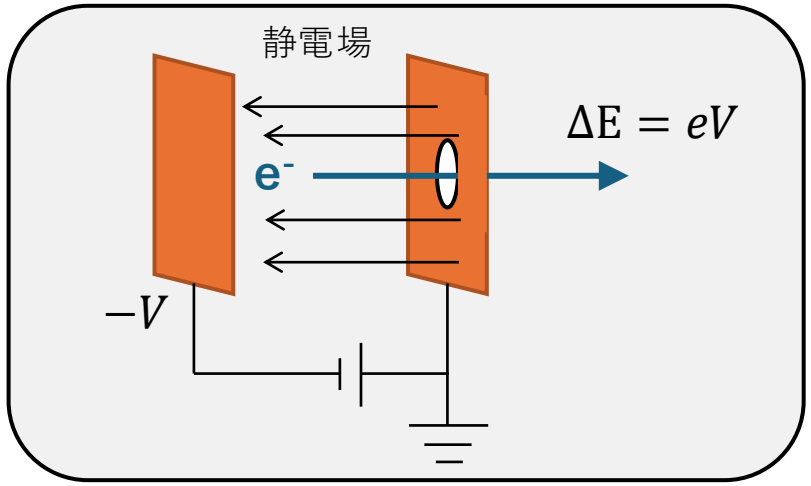




位相空間上の粒子分布

縦方向運動：高周波加速

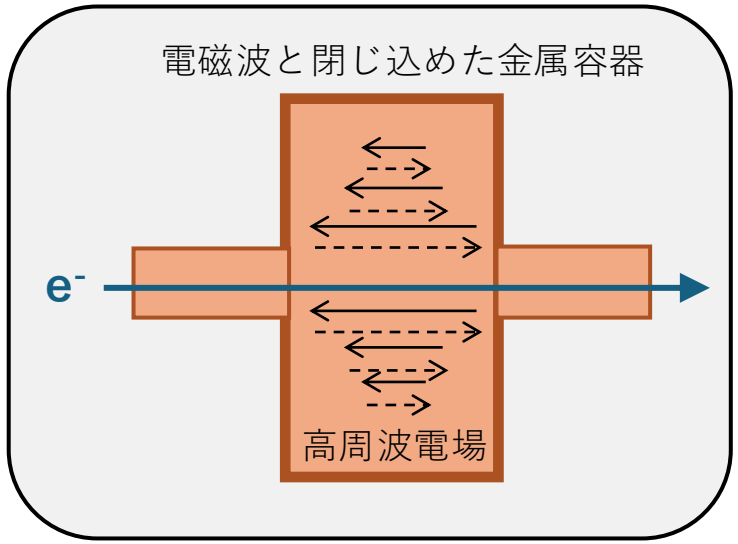
（参考）静電加速

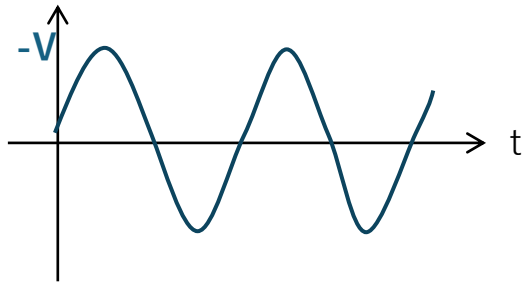


- 直流ビームを扱える
- 加速は1回だけ
- 電圧でエネルギーが決まる。

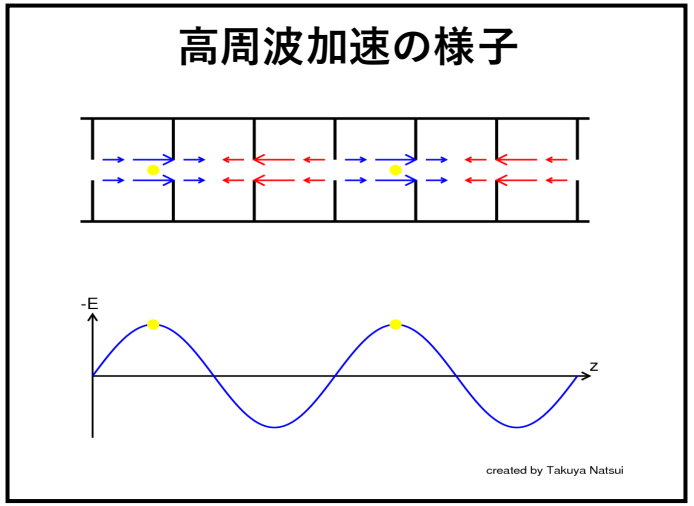


高周波加速





- 正弦波状に時間変化する電場。
- 繰り返し加速が可能

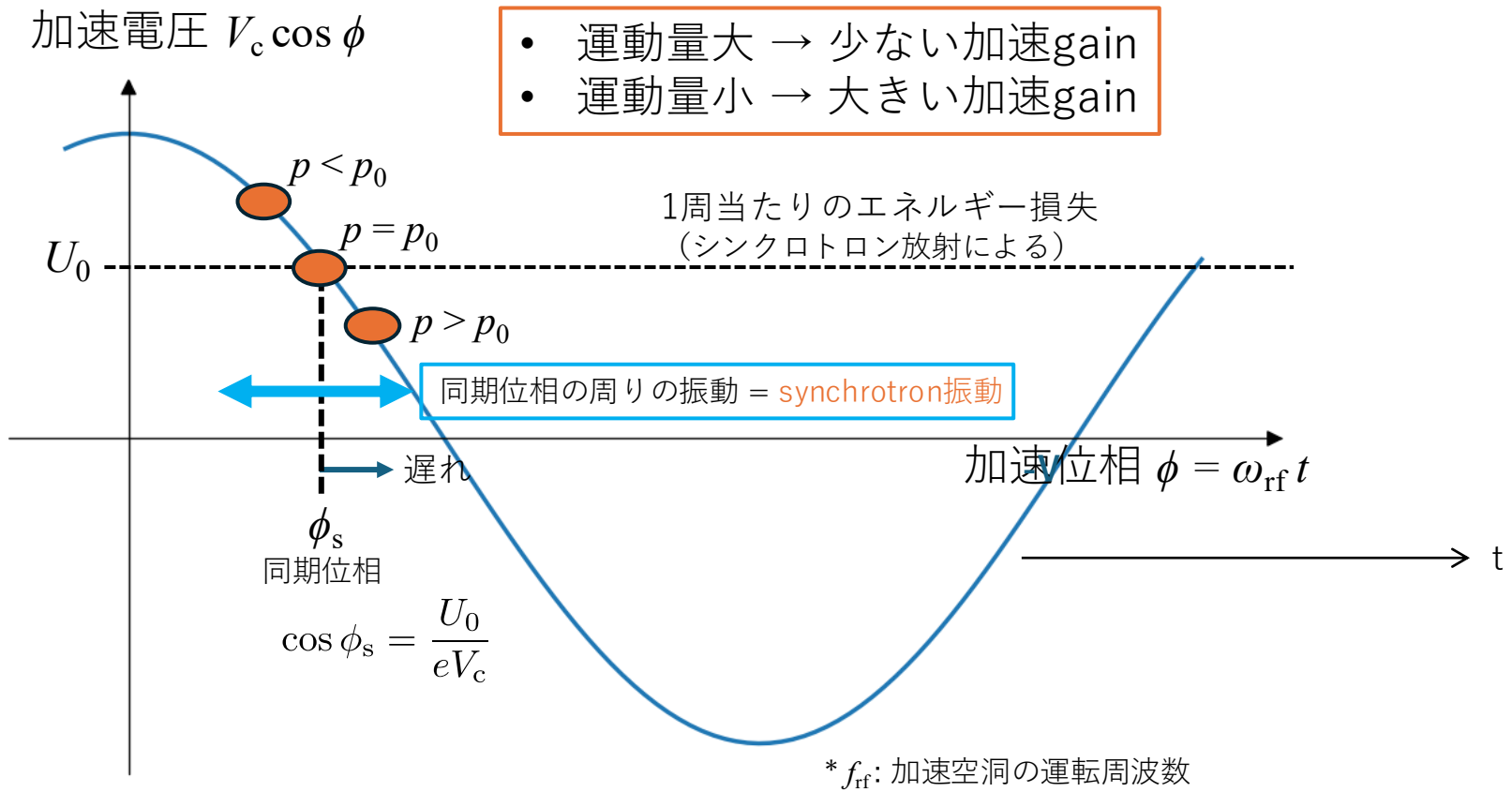


粒子の到着時刻に位相を同期させ、
タイミングよく加速する。

実際のビームのエネルギーはばらつき、到着時間も異なる。
安定的な加速は可能なのか？

位相安定性の原理

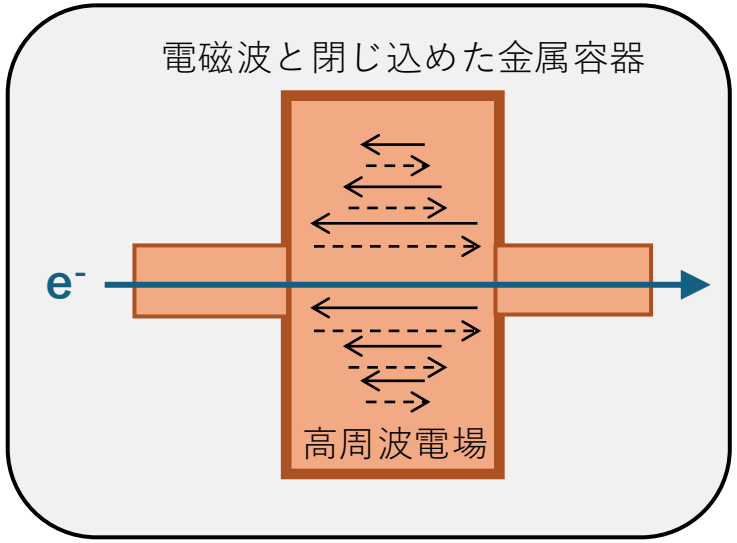
- 運動量に応じて周回時間が変化する
  - → RF空洞への到着時刻が変化
  - → 加速位相が変化（energy gainが変化）
  - → エネルギー、加速位相が振動



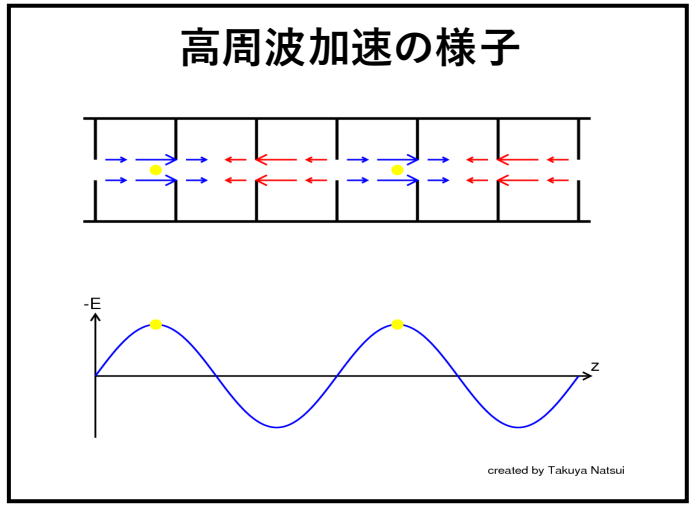
- 運動量大 → 少ない加速gain
- 運動量小 → 大きい加速gain

* f_{rf}: 加速空洞の運転周波数
SuperKEKBでは f_{rf} = 508.9 MHz

高周波加速



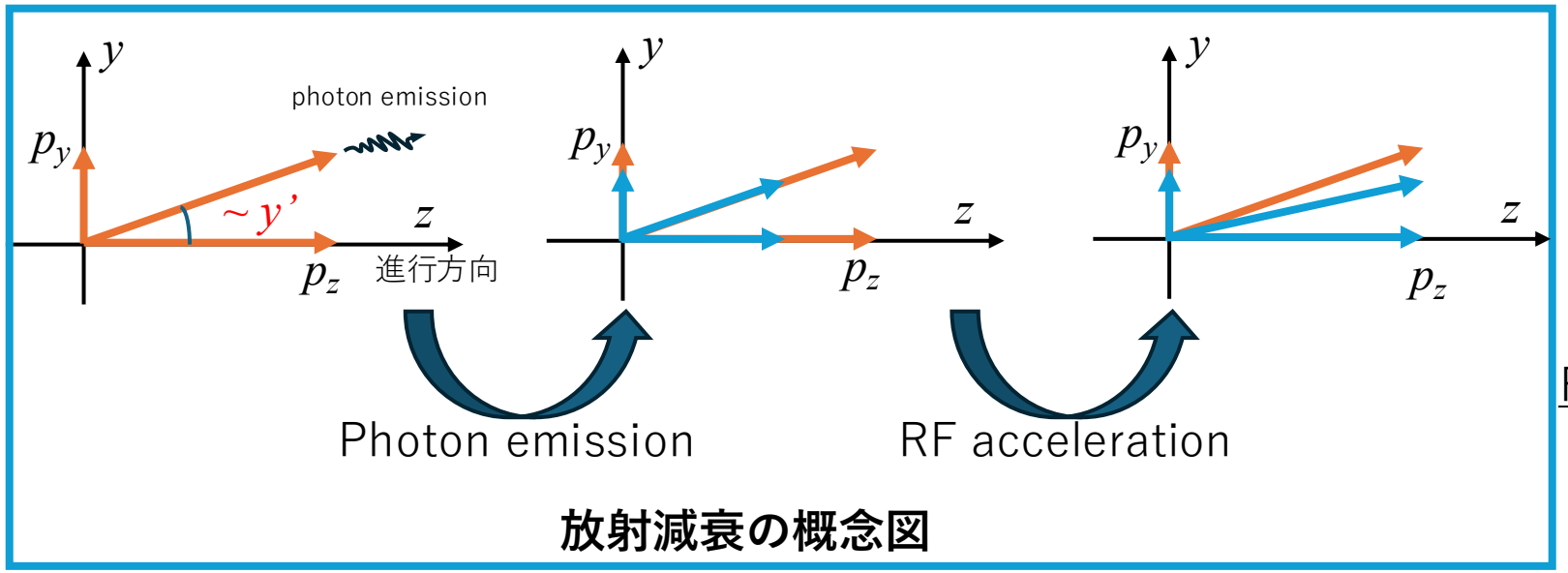
高周波加速の様子



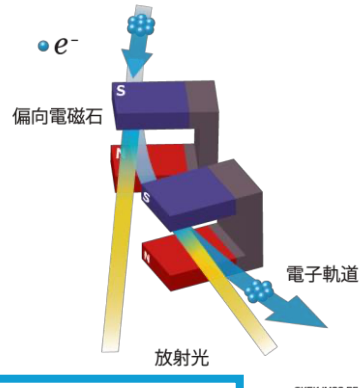
エネルギーを安定に保つ。

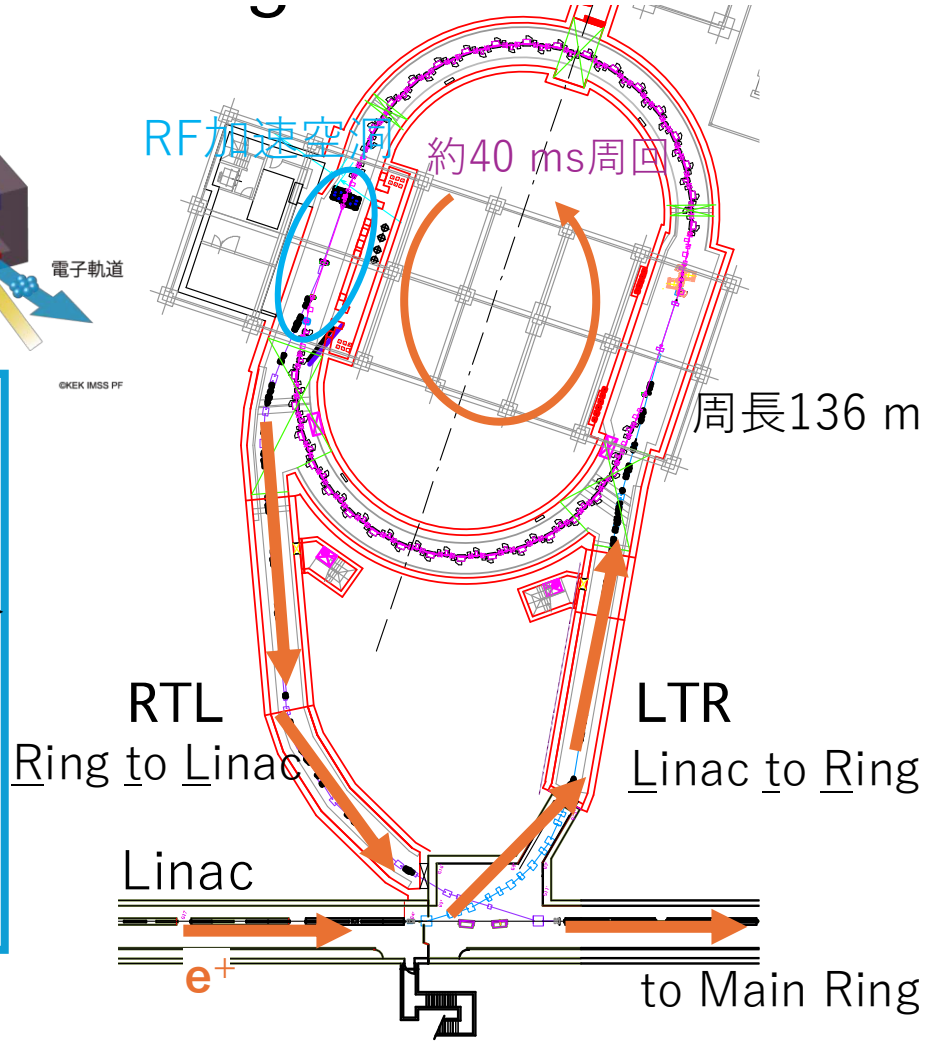
放射減衰 (radiation damping)

- 蓄積リングでは、e+とe-はsynchrotron放射を行う。
- Synchrotron放射とRF加速を繰り返すことでbetatron振動が減衰（放射減衰）



放射減衰の概念図





例：Damping ring（後述）

- エミッタンスは放射減衰により低下していくが、最終的に光子放出による量子励起と釣り合う値に落ち着く:

$$\frac{\mathrm{d}\epsilon_u}{\mathrm{d}t} = -\frac{2}{\tau_u}\epsilon_u + \frac{2}{\tau_u}\epsilon_{u0} \quad (u = x, y)$$

放射減衰　　量子励起

τ_u: 放射減衰時間
ϵ_{u0}: 平衡エミッタンス

A. Wolski, CERN-2014-009 (2014).

(参考) ビーム力学の教科書

この分野で著名な教科書の例：

入門書

- H. Wiedemann, “Particle Accelerator Physics”, 3rd ed. (Springer, Berlin, 2007).
- S. Y. Lee, “Accelerator Physics”, 4th ed. (World Scientific, Singapore, 2018).

加速器スクール

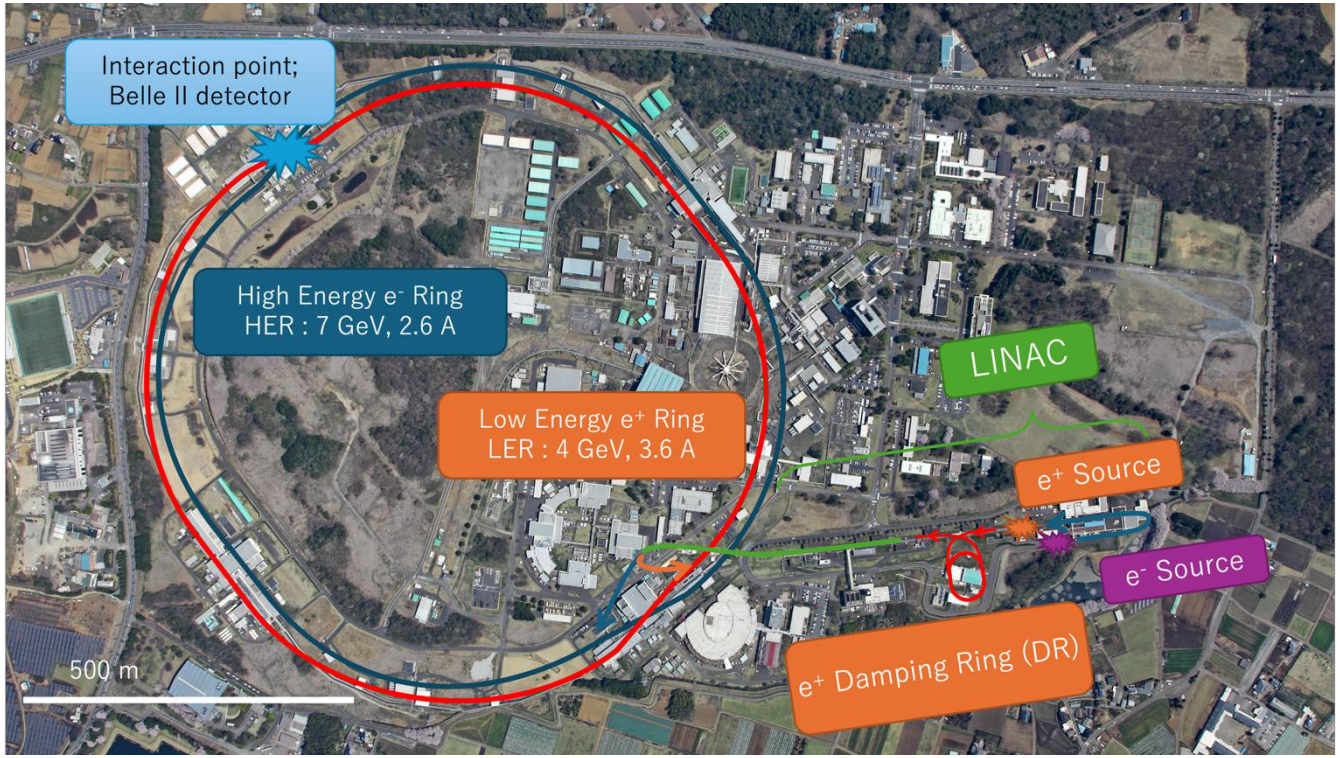
- OHO https://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html
- CERN Accelerator School (CAS) https://cas.web.cern.ch/
- U.S. Particle Accelerator https://uspas.fnal.gov/index.shtml

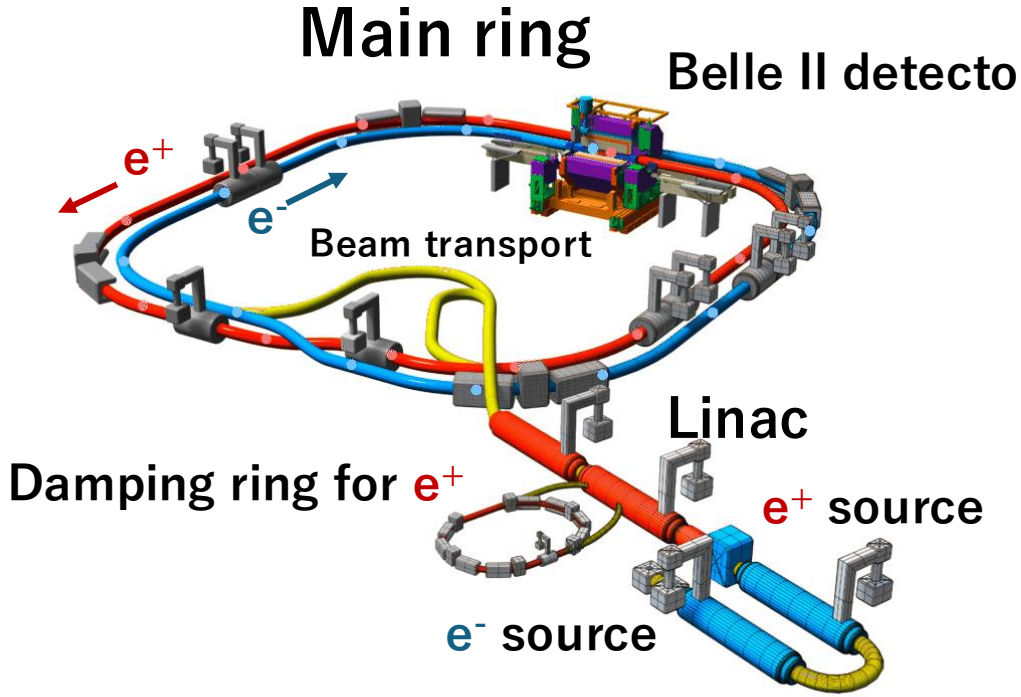
本講義では最低限の知識に留めた。だが本来はハミルトン力学、非線形力学(共鳴・力学口径)、リー代数、確率過程、多粒子系の集団効果などの物理を駆使する奥の深い分野。興味に応じて上記を参照されたい。

SuperKEKB加速器

SuperKEKB加速器

茨城県つくば市 高エネルギー加速器機構つくばキャンパスにある。





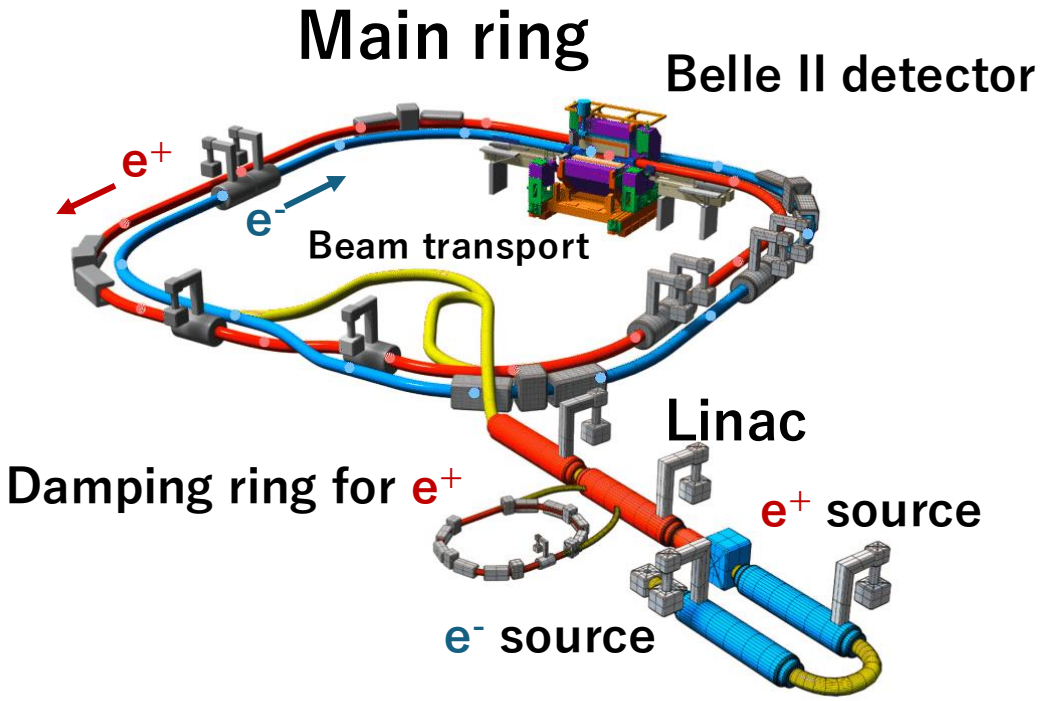
つくばキャンパスには他にも、以下のような加速器がある。

- 光源加速器: Photon Factory (PF), PF Advanced Ring (PF-AR)
- Advanced Test Facility (ATF)
- Superconducting Test Facility (STF)
- Compact Energy Recovery Linac (cERL)

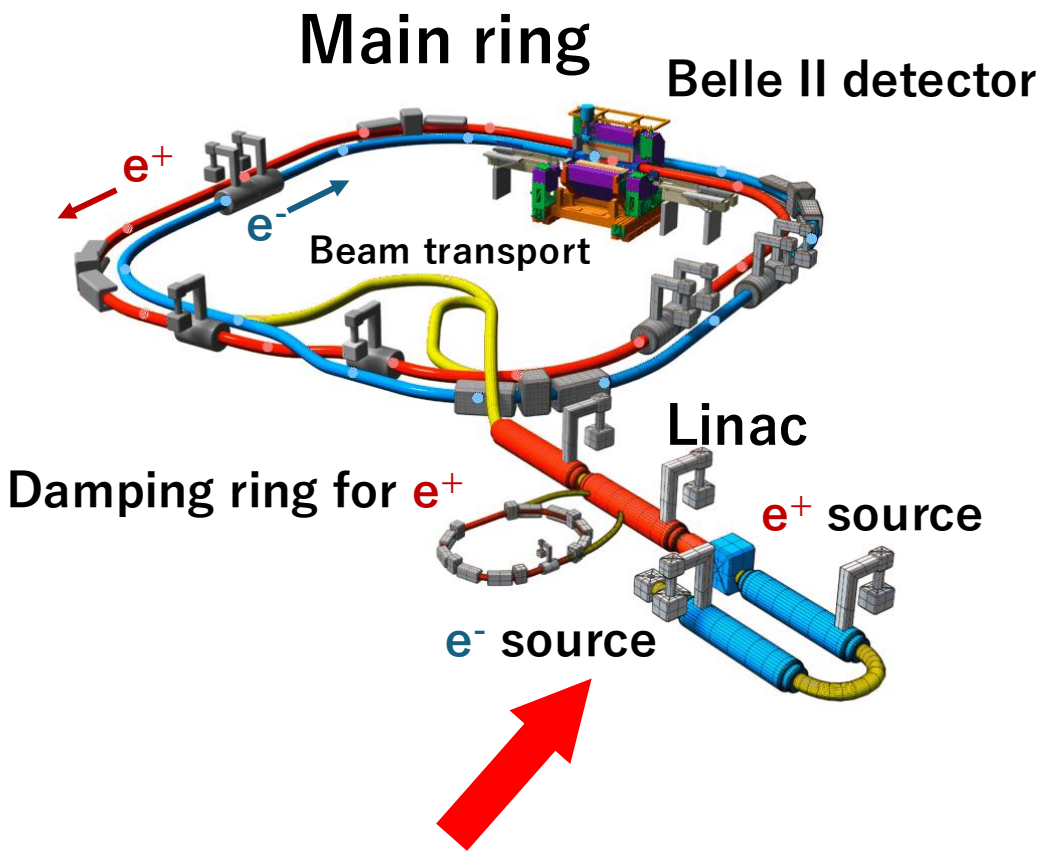
SuperKEKB加速器

粒子の生成から衝突まで

- 電子・陽電子源
- Linac (線形加速器)
- 陽電子ダンピングリング
- Beam Transport Line (BT)
- Main Ringへのビーム入射
- Main Ring (LER, HER) での安定周回と衝突

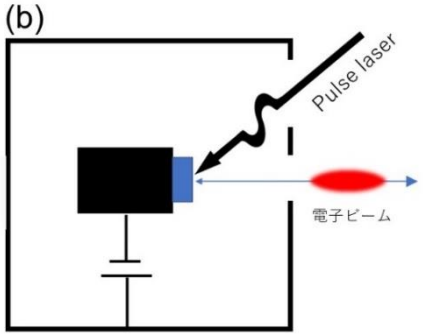


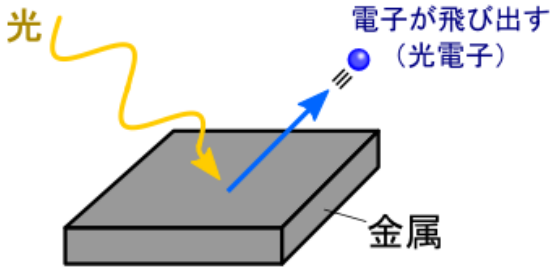
電子源



物質中に大量にある電子を、仕事関数より大きなエネルギーを与えて取り出す。SuperKEKBでは二つの方式を利用。

光陰極電子銃：低エミッタンス

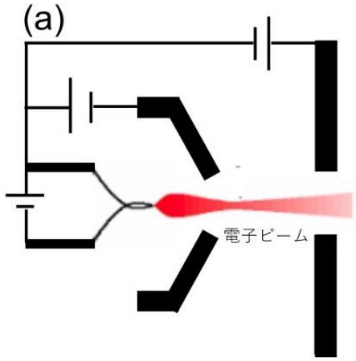




光電効果

カソード(光電面)に入射するレーザーのプロファイルに応じた電子ビームを引き出せる。この電子ビームはMain Ring まで加速。

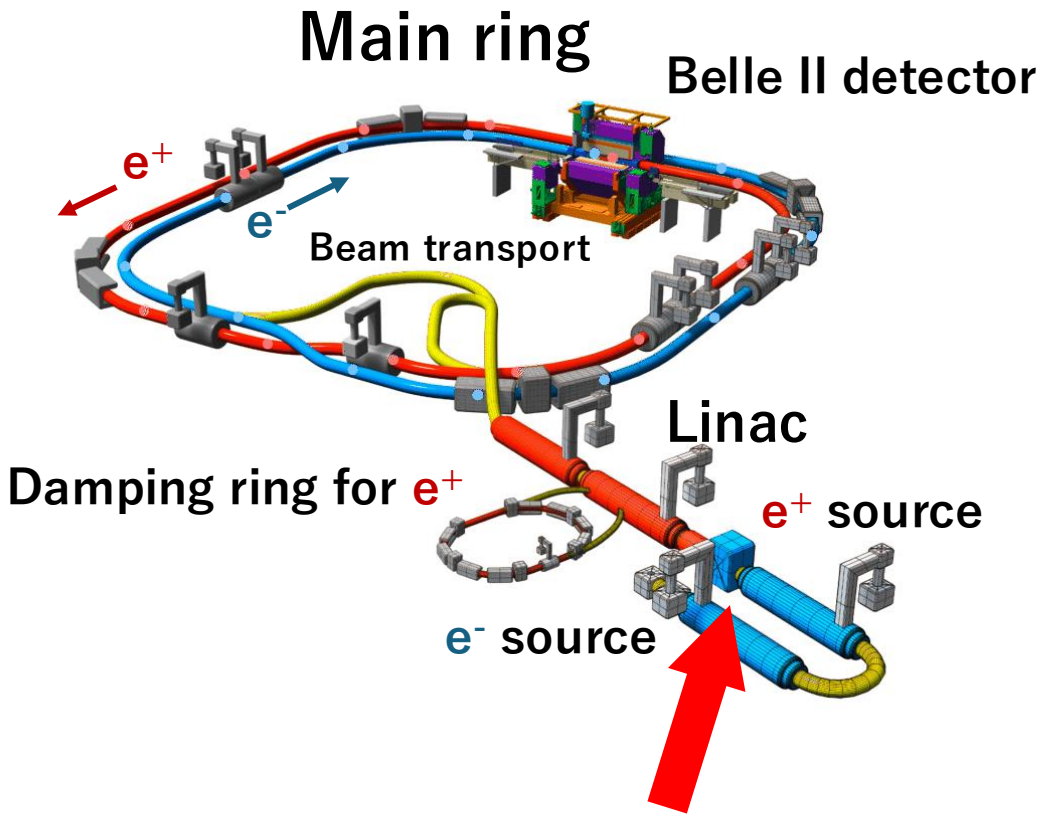
熱電子銃：大電流





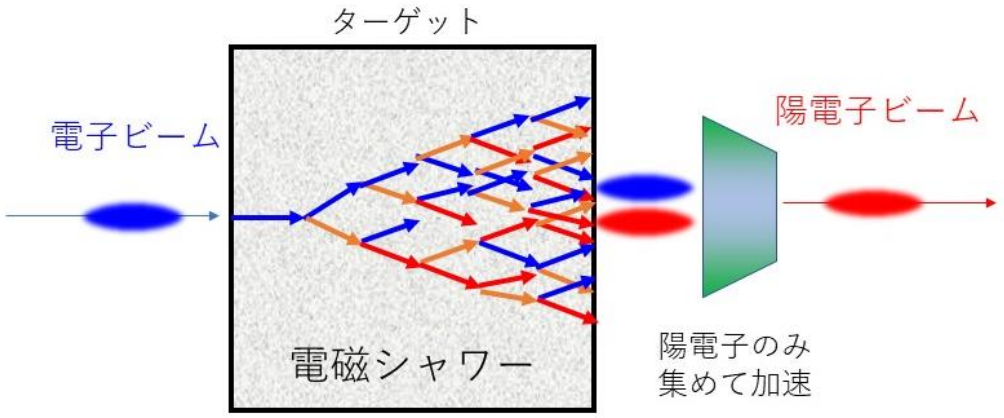
効率的な陽電子の生成のために用いられる。(次のページ)

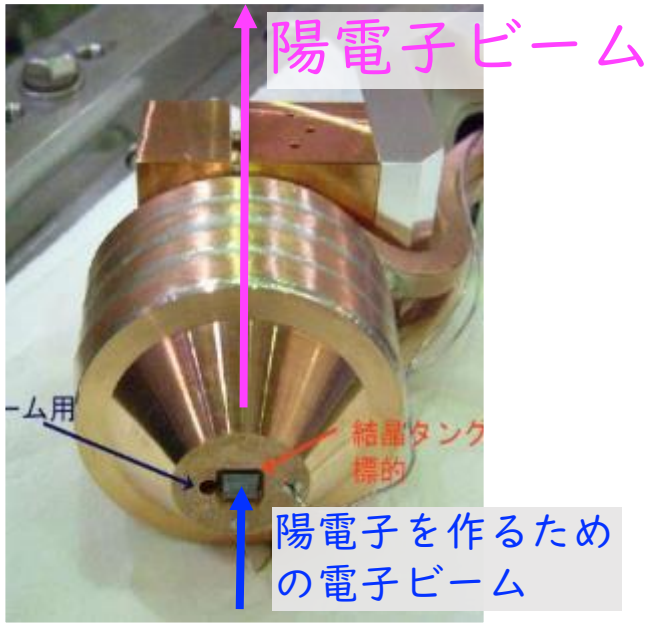
陽電子源



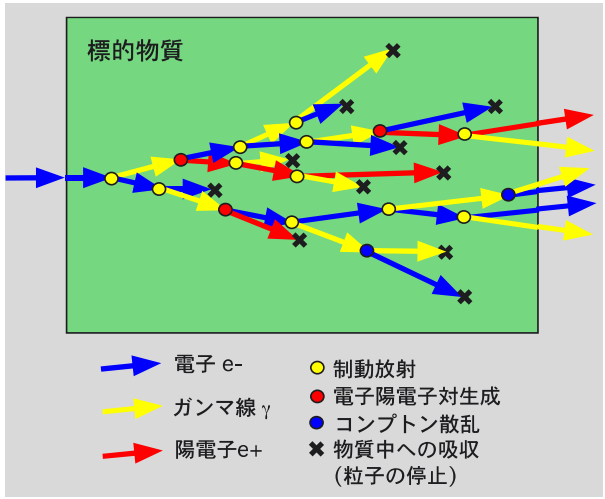
陽電子は物質から直接取り出せない。
物質・放射線の相互作用で作り出す。

- 制動放射によるガンマ線の発生。
- 電子対生成による電子・陽電子の生成。

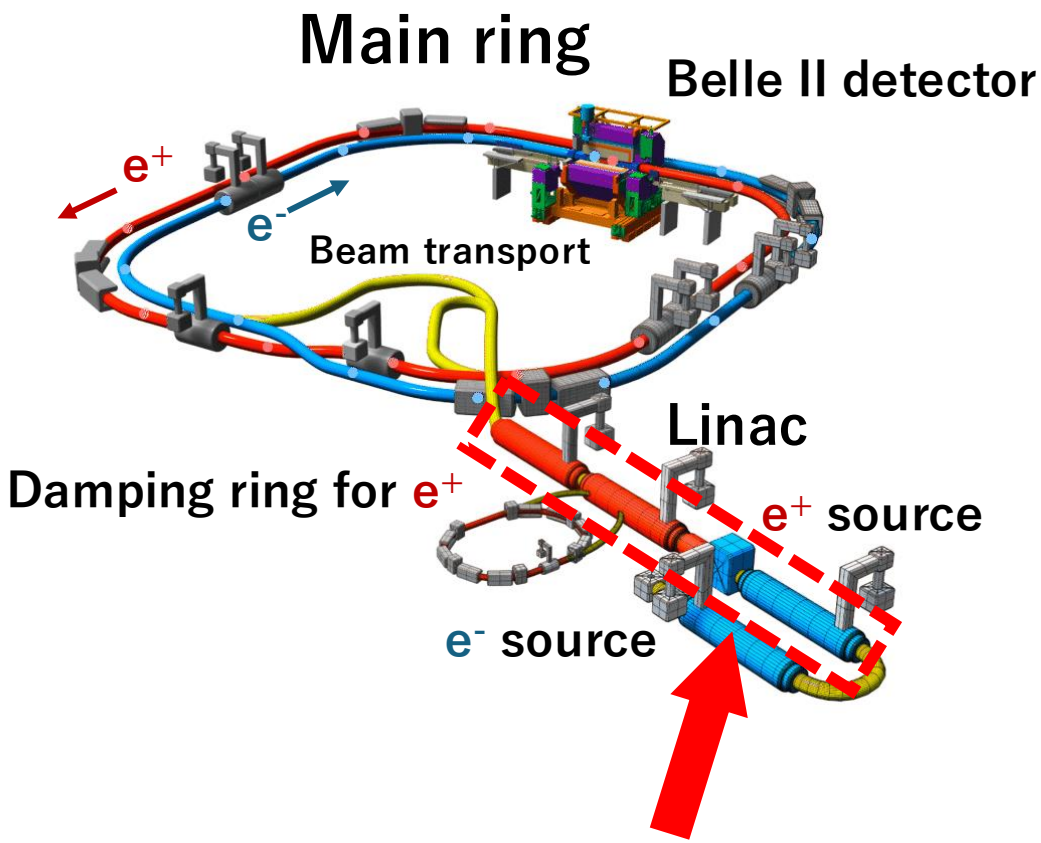




タングステン
(Φ4mm)

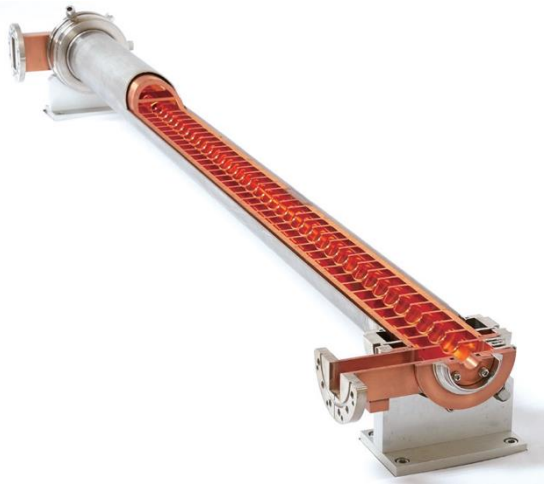


Linac



- 電子・陽電子ビームを加速し、下流に供給する、長さ700 mの線形加速器。
- エネルギー：電子 7 GeV、陽電子 4 GeVまで加速。
- SuperKEKB、光源加速器PF、 PF-ARに同時にビームを供給。

電子・陽電子加速管のカットモデル

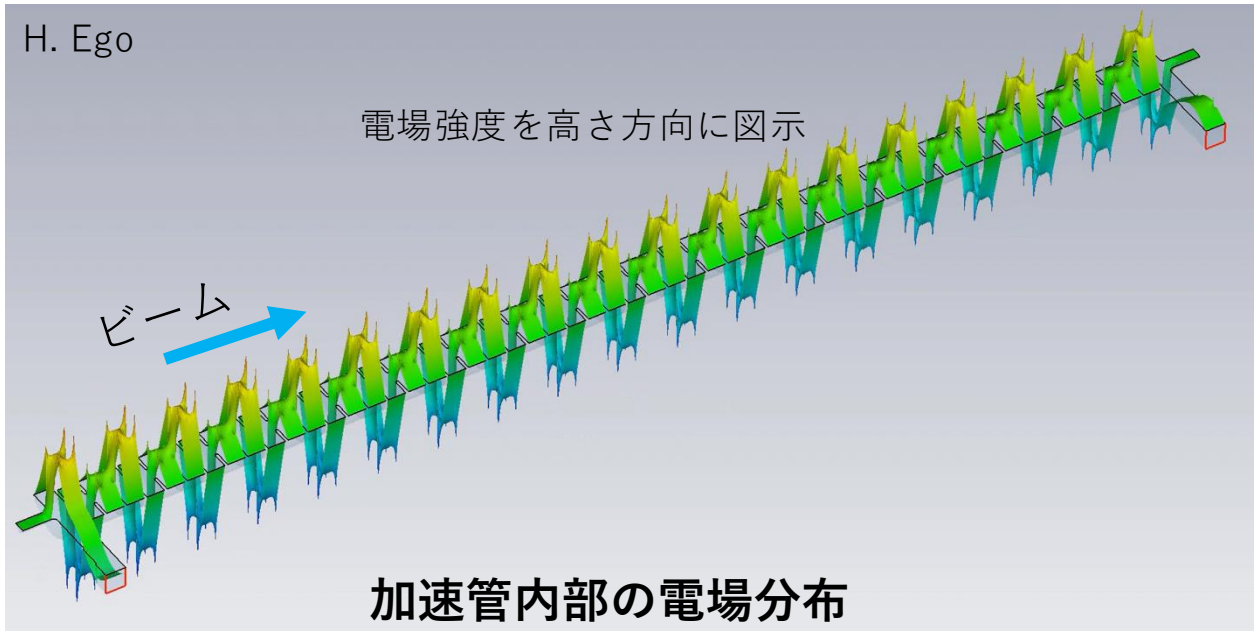


Linacトンネル内部



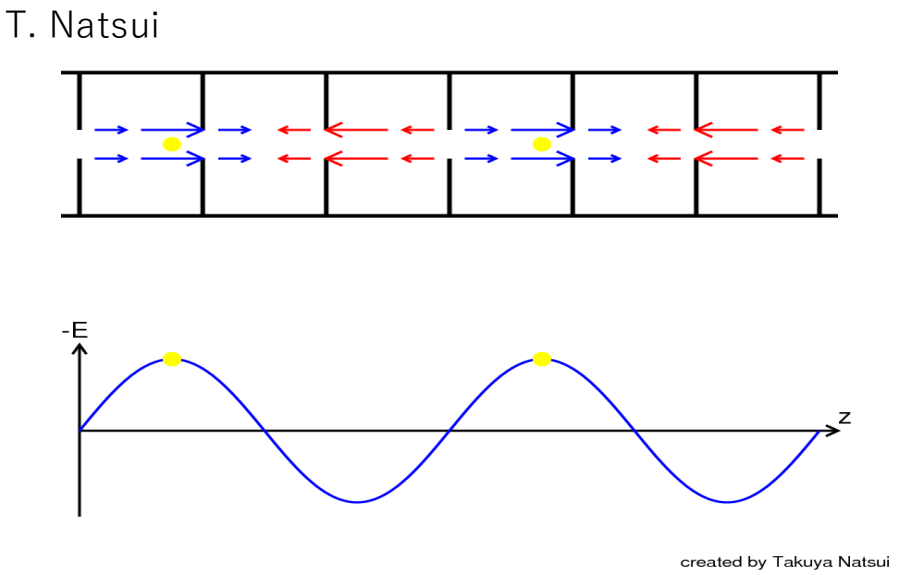
Linacでの高周波加速

- 周波数2856 MHzのマイクロ波を用いて電子・陽電子を加速
- 加速勾配: 20 MV/m



加速管内部の電場分布

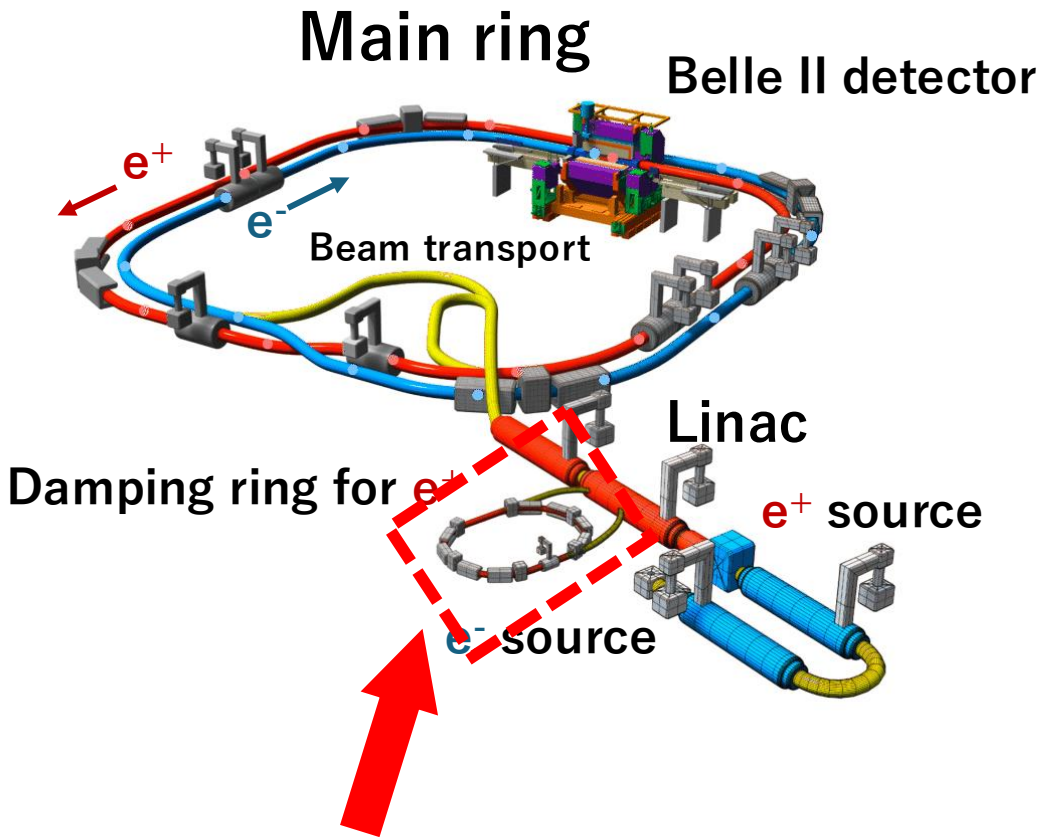
タイミングよく進行方向電場を立たせる。



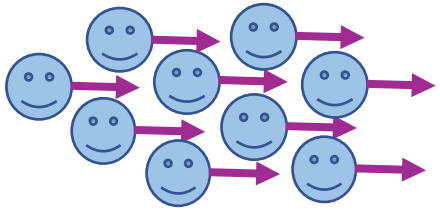
粒子の位置と電場の向き

Damping Ring

陽電子源で作られた陽子ビームのエミッタンスを小さくするためのリング。周長 136 m, エネルギー1.1 GeV。

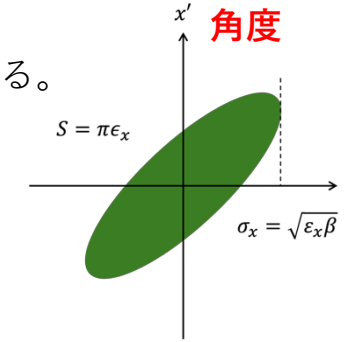


光陰極電子銃で作られた電子

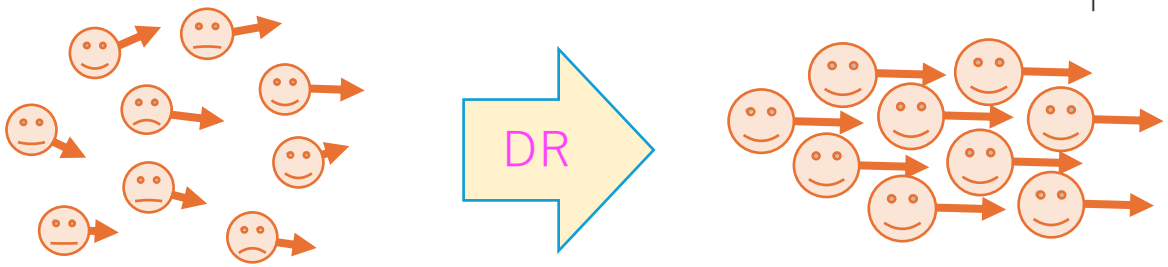


→ 生まれた時から揃っている

※揃うように最適化されている。



陽電子

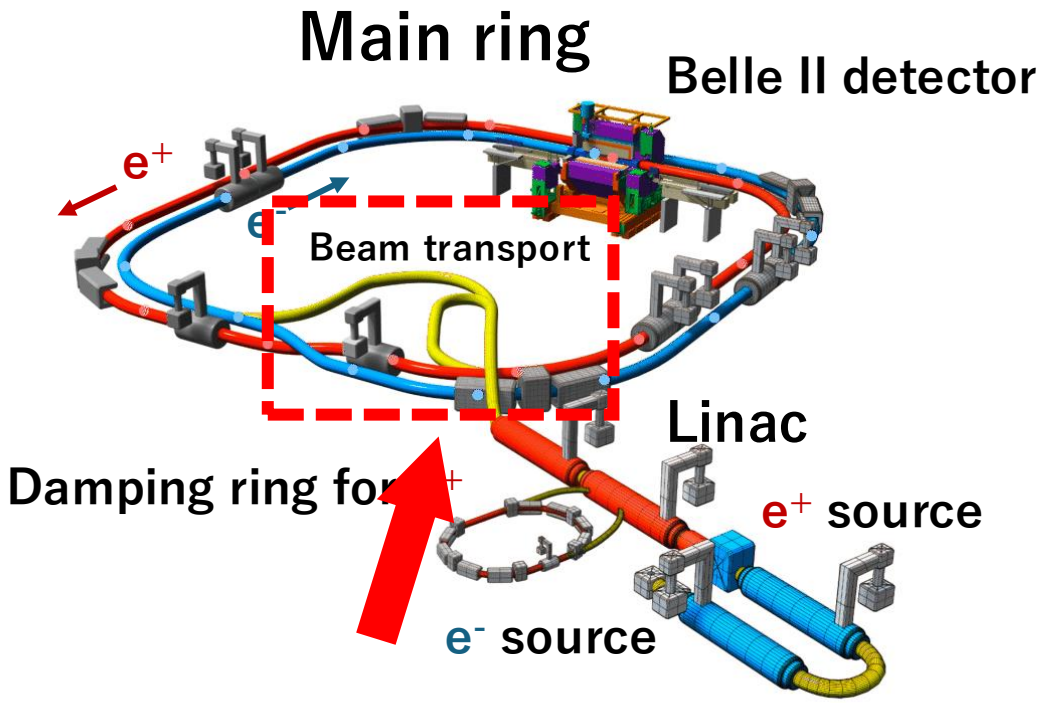


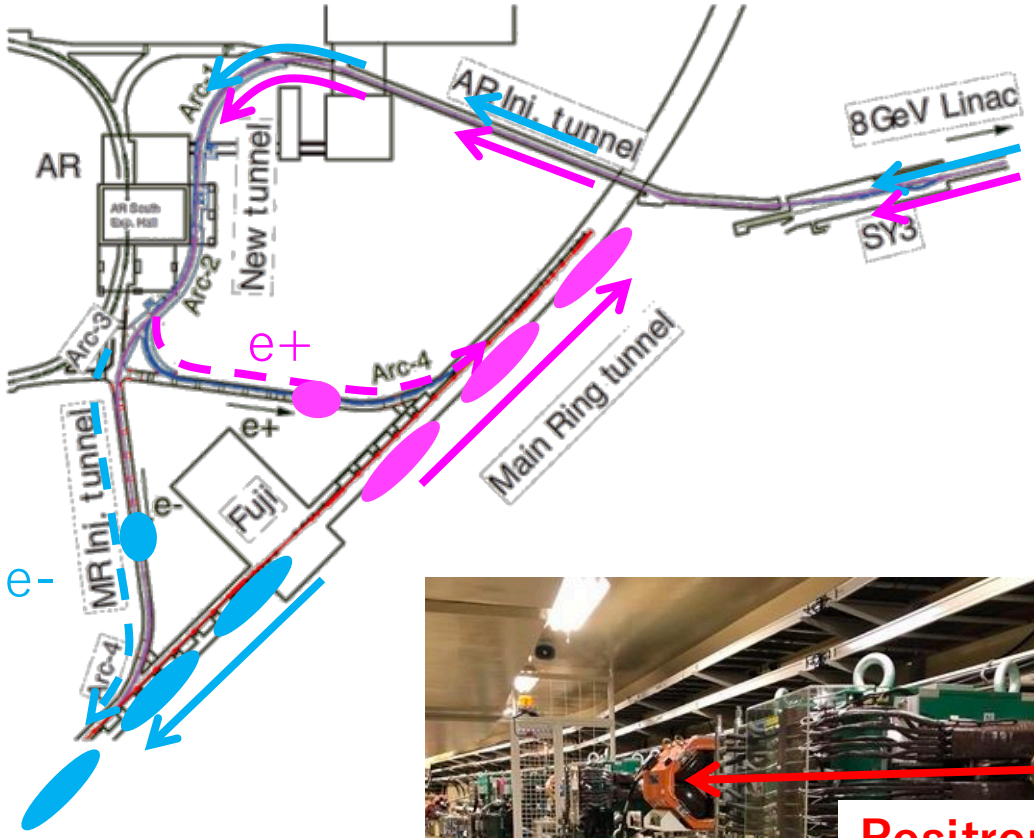
Damping Ring の必要性：陽電子は物質から直接取り出せないので物質・放射線の相互作用で作り出す。だが、運動量が揃った状態で生成するのは困難。

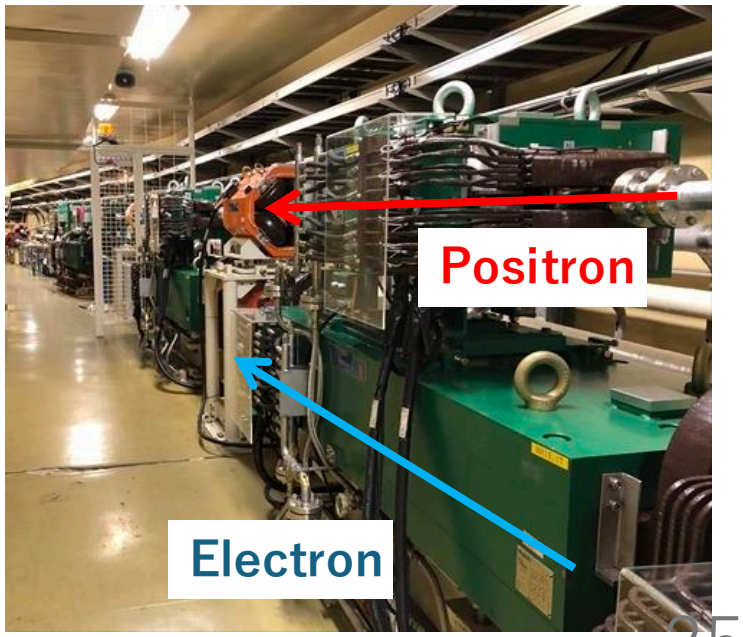
Damping Ring を通す事で揃える。

放射減衰(前述)で揃える。

Beam Transport Line (BT)





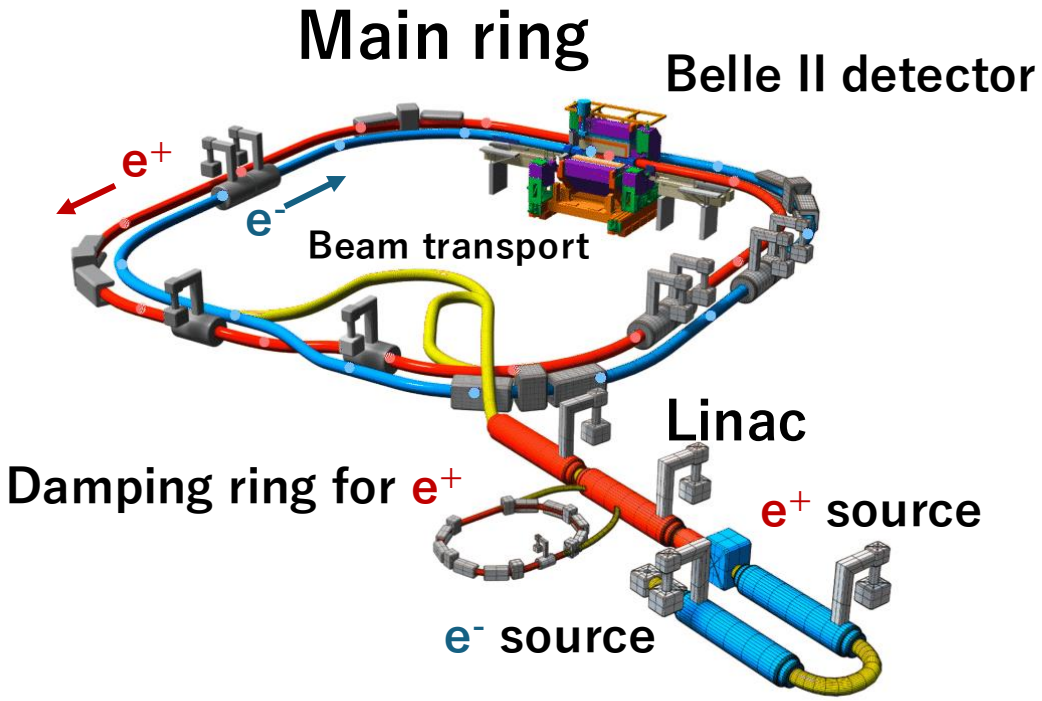


- LINACからMain Ringへのビーム輸送路。
- ビームの品質を測定・診断する。
- 品質が低ければ、Main Ring への入射効率が落ちる。

SuperKEKB加速器

粒子の生成から衝突まで

- 電子・陽電子源
- Linac (線形加速器)
- 陽電子ダンピングリング
- Beam Transport Line (BT)
- Main Ringへのビーム入射
- Main Ri



高周波加速されたビームは周回中のリングに合流。
周回中のビームの様子は？どのようにそこへ入射?

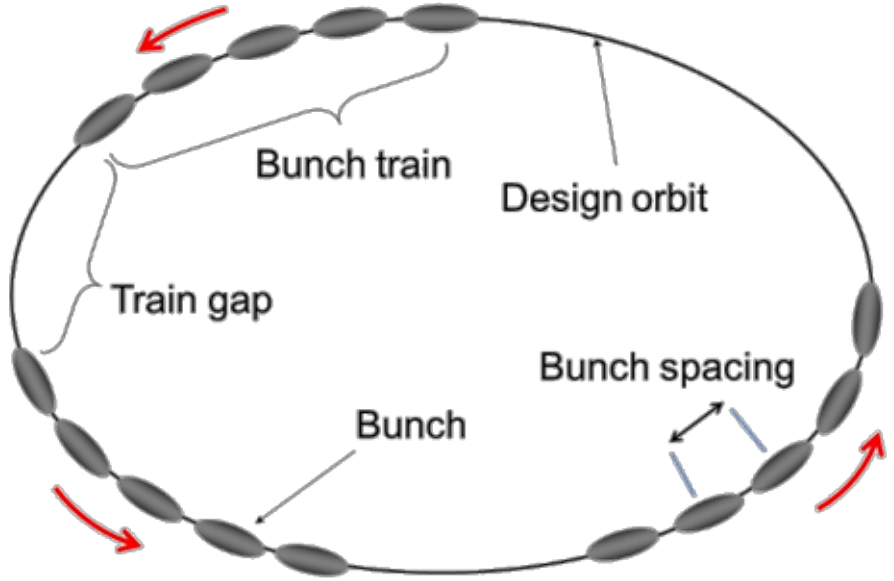
周回中のビーム

- リング内最大バンチ数（ハーモニクス数）：h

  $h = f_{RF}/f_0$（RF周波数 f_{RF}）
- 最小バンチ間隔：$t_b = 1/f_{RF}$
- ビーム電流：$I = nN_b e f_0$　　現在：LER 1.6 A, HER 1.2 A

  周回周波数：f_0　バンチごとの粒子数：N_b

SuperKEKBの場合、
- $f_0 \sim 100\ \mathrm{kHz}$
- $n = 2500$
- $f_{\mathrm{RF}} \sim 508\ \mathrm{MHz}$
- $h = 5120$
- $t_b \sim 2\mathrm{ns}$



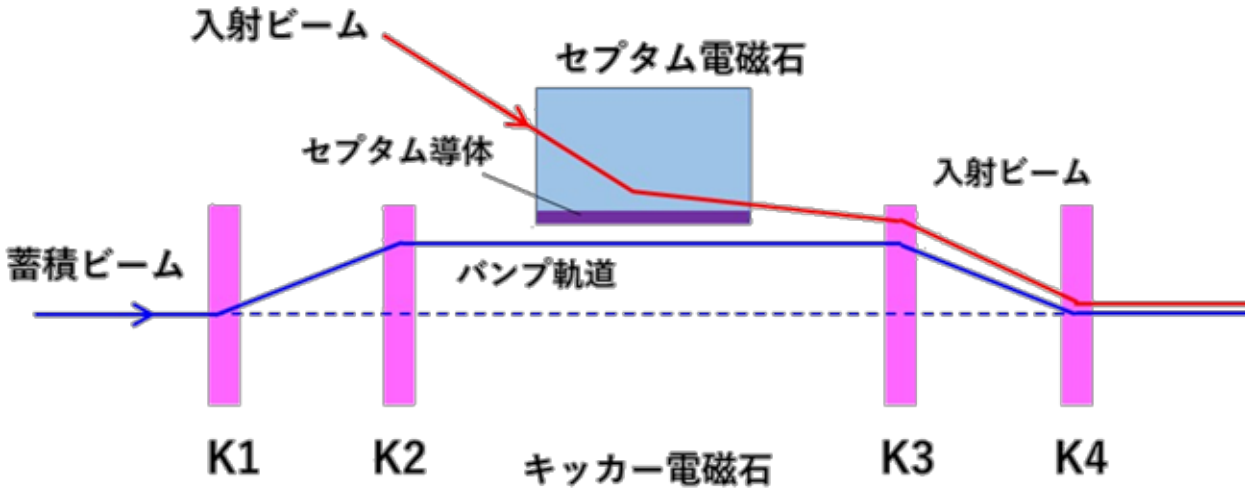
Bunchの連なり：Bunch train
Bunch trainの間隔：Train gap

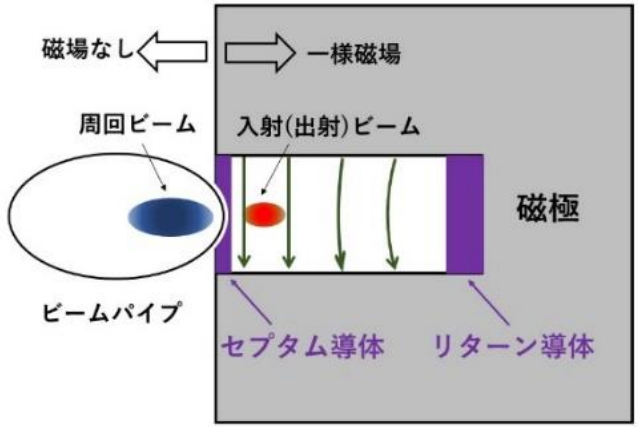
なぜ、すべてのBunchにビームを入れないのか？

→ビームの安定入射のため。

Main Ring への入射

キッカー磁石とセプタム磁石を使った入射。

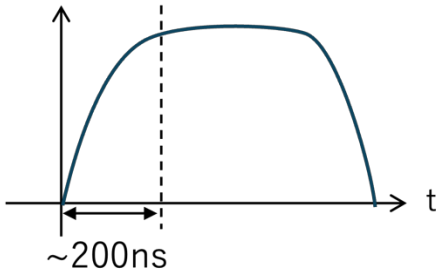




周回ビームに影響を与えず
入射ビームのみを蹴る。

**キッカー電磁石の磁場が一定と
なるまではビームが無い状態へ**

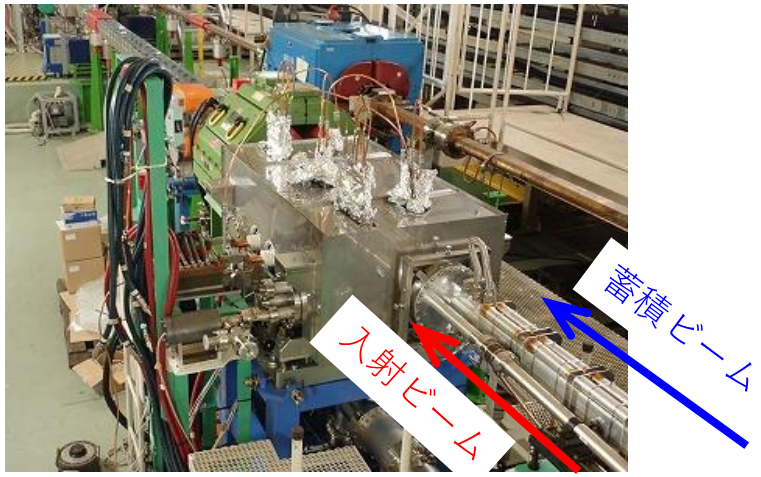
キッカー磁場



キッカー電磁石



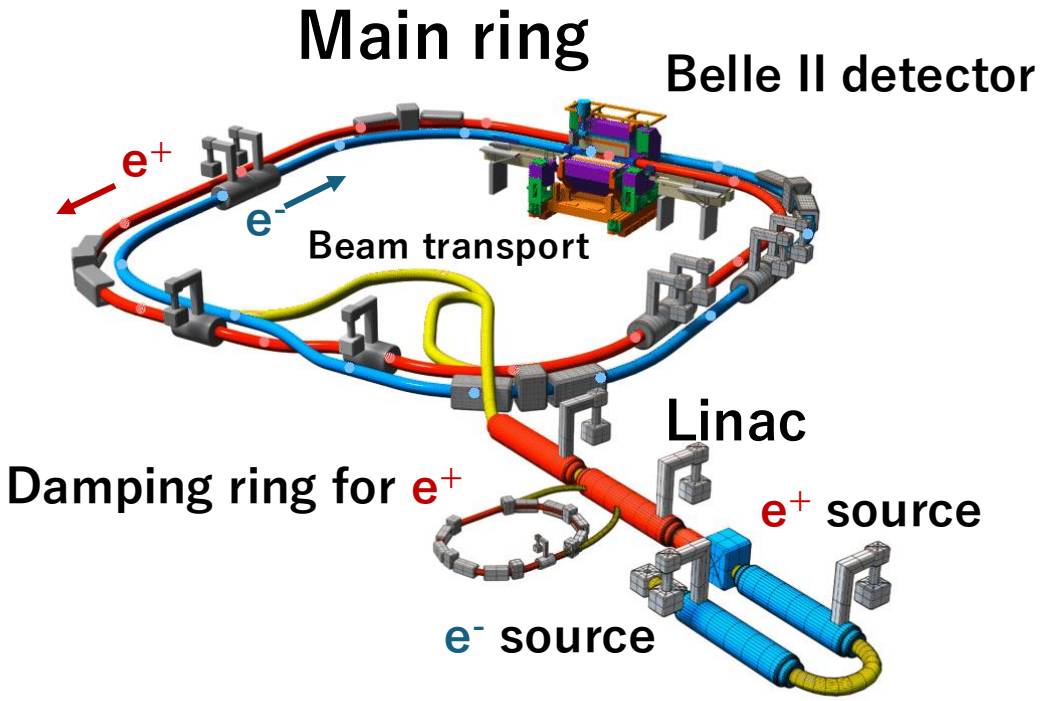
セプタム電磁石



SuperKEKB加速器

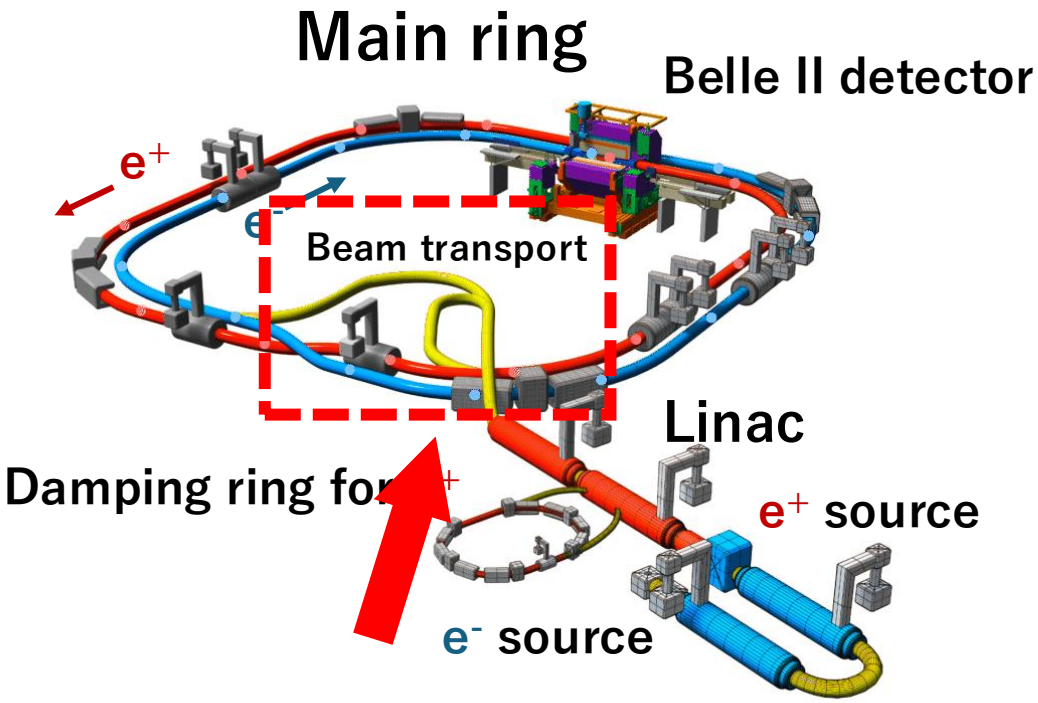
粒子の生成から衝突まで

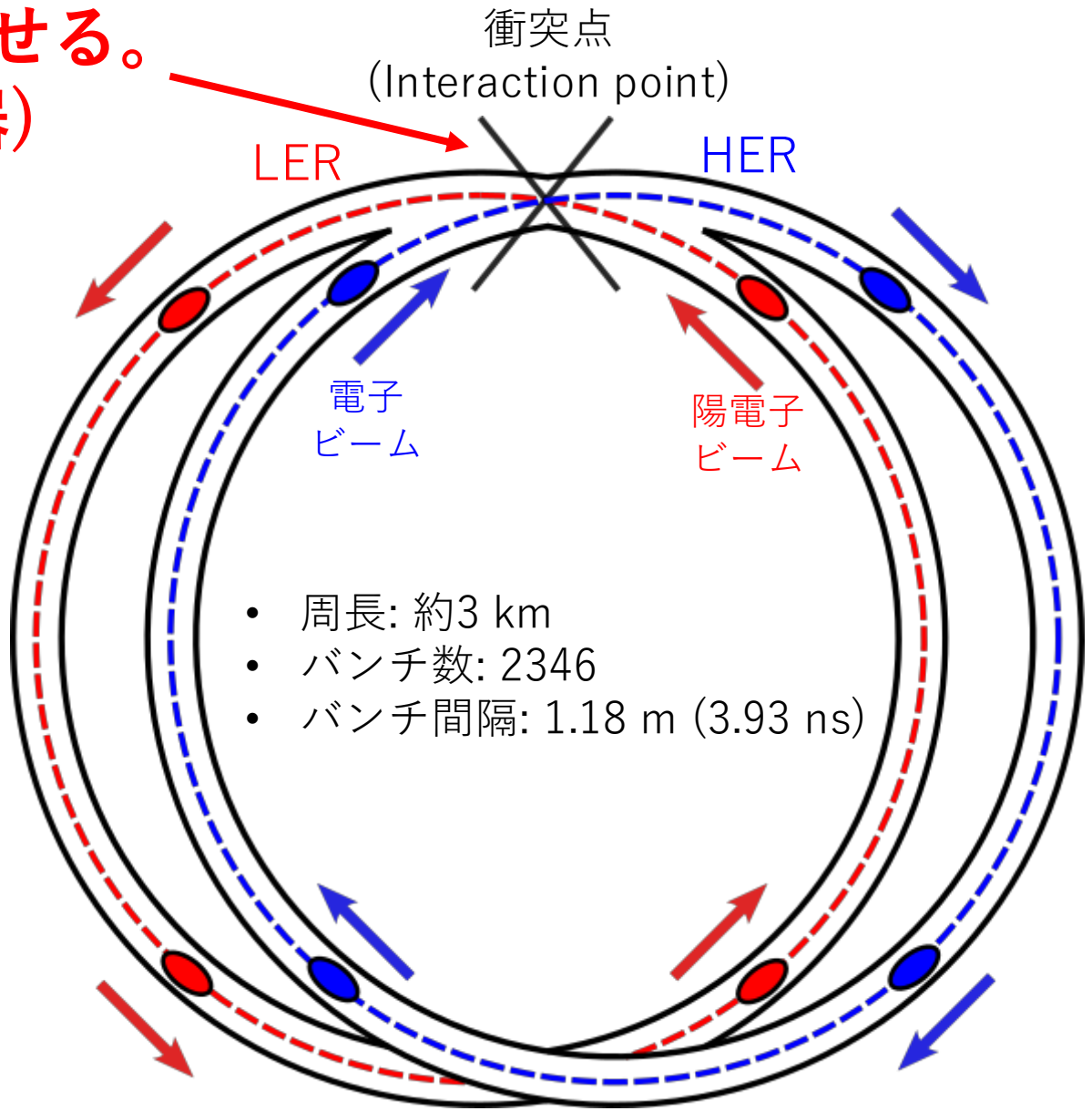
- 電子・陽電子源
- Linac (線形加速器)
- 陽電子ダンピングリング
- Beam Transport Line (BT)
- Main Ringへのビーム入射
- Main Ring (LER, HER)での安定周回と衝突



Main Ring

ここで衝突させる。
(衝突型加速器)



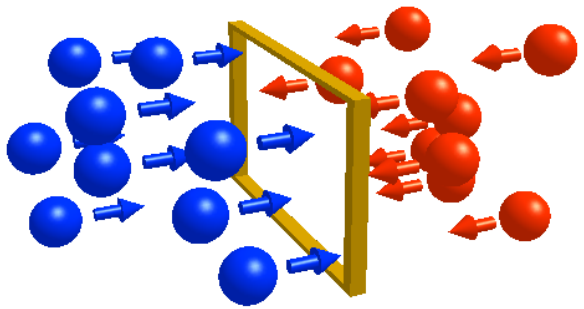


- 電子・陽電子を**安定に周回・衝突**させる。
- 二つのリング
  - Low Energy Ring (LER) : 4 GeV 陽電子リング
  - High Energy Ring (HER): 7 GeV 電子リング

衝突型加速器の性能指標：Luminosity

衝突型加速器：ビームを安定に周回させ、繰り返し衝突させる。

衝突型加速器の指標：単位面積・単位時間あたりに衝突が起きる頻度 → **Luminosity**



$$F\ [\mathrm{s}^{-1}] = L\ [\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}] \times \sigma\ [\mathrm{cm}^{2}]$$

事象が単位時間に起きる頻度

Luminosity
加速器の性能に依存

反応断面積
人間による調整不可

Luminosity **高** → 事象が起きる頻度 **高** → 希少な事象のデータ **多**

SuperKEKBにおけるビーム物理研究の大目標はLuminosity 向上に帰着する。

目標：Luminosity $> 6\times10^{35}\ \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$

Luminosity

Luminosity：単位面積・単位時間あたりに衝突が起きる頻度。

粒子数　　衝突頻度 (Hz)

$$L = \frac{N_{e+} N_{e-} f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} = \frac{\gamma_\pm}{2 e r_e}\left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right)\frac{\xi_{y\pm} I_\pm}{\beta_{y\pm}^*}$$

衝突点でのビームサイズ

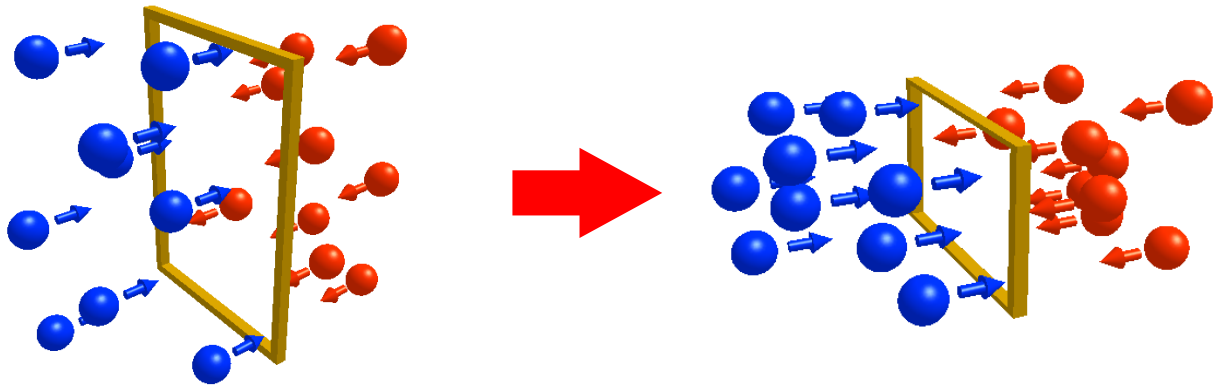
ビームビームパラメータ

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e}{2\pi\gamma_\pm}\frac{\beta_{y\pm}^* N_\mp}{\sigma_{y\mp}^*\left(\sigma_{x\mp}^* + \sigma_{y\mp}^*\right)}$$

Luminosityは以下の３つに依存

- 電流 $I_\pm$
- 衝突点ベータトロン関数 $\beta_{y\pm}^*$
- ビームビームパラメータ $\xi_{y\pm}$

$\xi_{y\pm}$を保ちながら、**$\beta_{y\pm}^*$を小さく**、
$I_\pm$を大きくするのがSuperKEKBの方針。



ビームビーム力：
衝突時に働くビーム間の電磁的相互作用

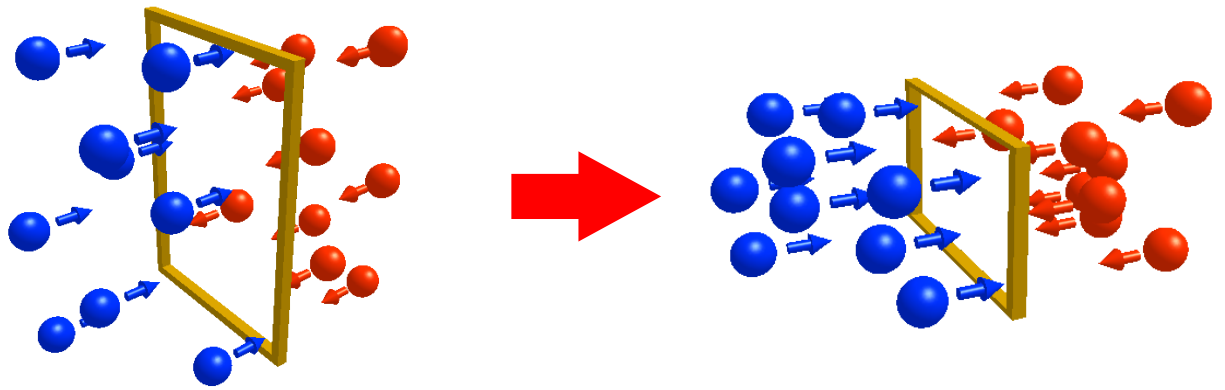
上記は陽に書き出したもの。

Luminosityを高めるには

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

電流

ビームサイズ



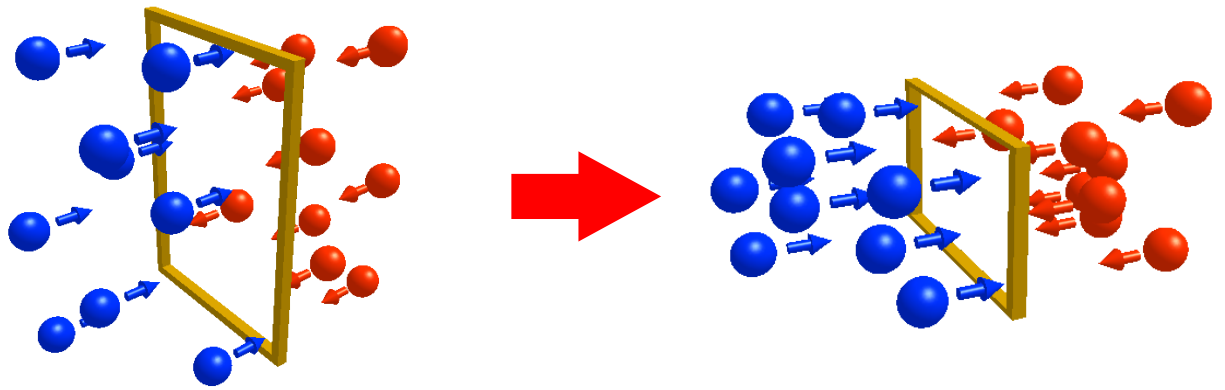
1. **そもそもビームを安定的に周回させる。**
2. **衝突点のビームサイズを絞る。**
3. **大電流ビームの蓄積。**

Luminosityを高めるには

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

電流

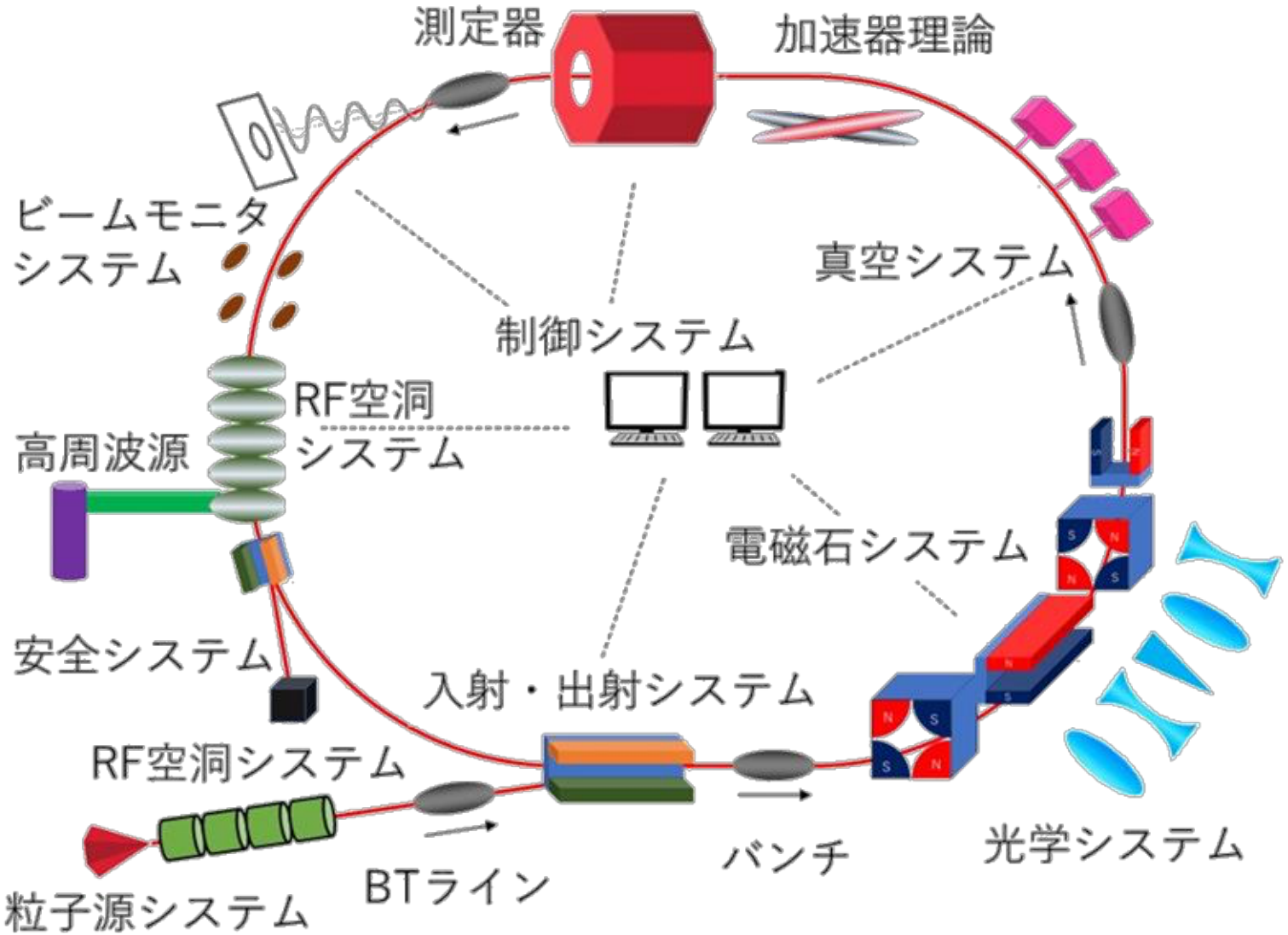
ビームサイズ



1. **そもそもビームを安定的に周回させる。**
2. 衝突点のビームサイズを絞る。
3. 大電流ビームの蓄積。

様々な加速器構成機器が用いられる。

Main Ringの構成要素



電磁石と電源

ビーム運動を安定的に制御するための電磁石と、それに電流を供給する電源。
電磁石の磁場が変わればビーム光学が変わるため、高い安定度が必須。

偏向電磁石





~1MW

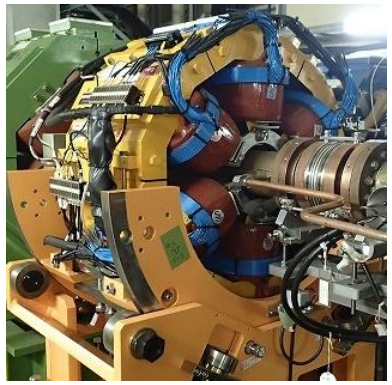
四極電磁石





10 ~ 100kW

六極電磁石



補正二極電磁石

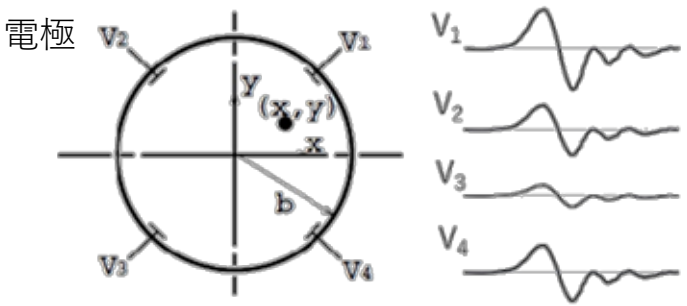


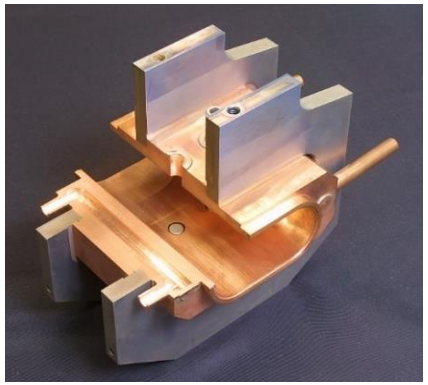


ビームモニター

ビームパイプ中のビームを直接、目で見ることはできない。
ビームによって励起される電気信号や放射光を測定することによって、ビームの位置やサイズ、電流量を測定。

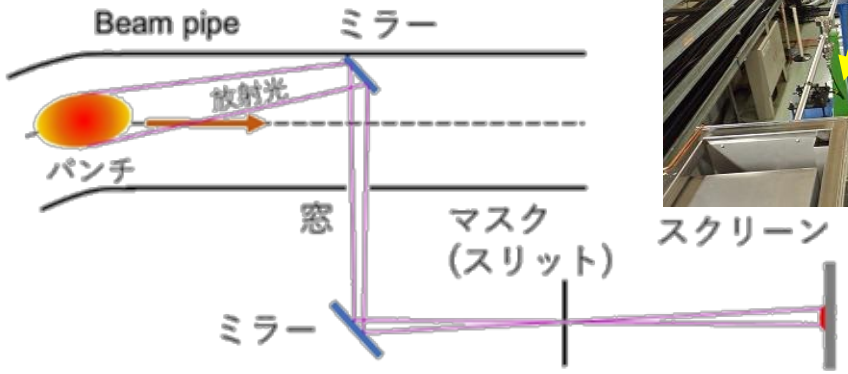
ビーム位置モニター(BPM)





- 約1000台
- 数 μm 程度の精度で測定可能
- ビーム軌道の観測・補正
- ビーム光学測定

ビームサイズモニター



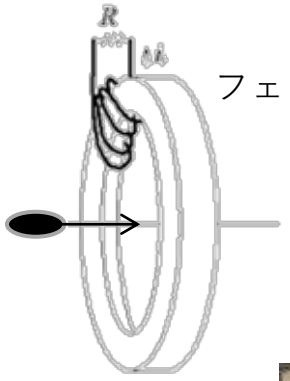


- 放射光を観測。
- 特定の波長の電磁波(X線)を取り出しスクリーンまで輸送
- カメラでその像を計測。
- 衝突点におけるビームサイズを間接的に見積もる。

ビームモニター

ビームパイプ中のビームを直接、目で見ることはできない。
ビームによって励起される電気信号や放射光を測定することによって、ビームの位置やサイズ、電流量を測定。

電流モニター

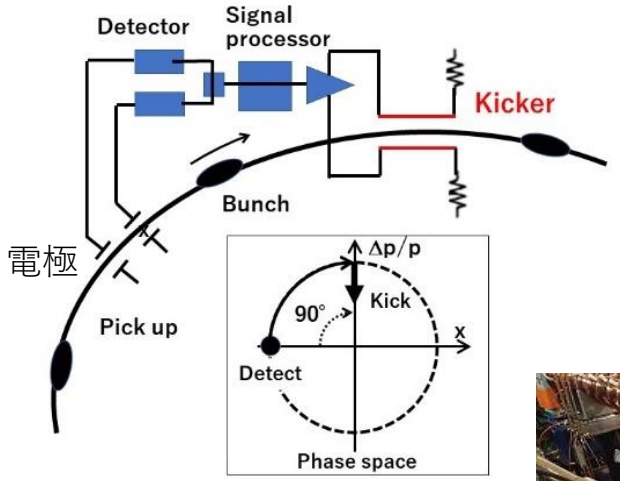


CT (Current Transformer)
DCCT (DC Current Transformer)

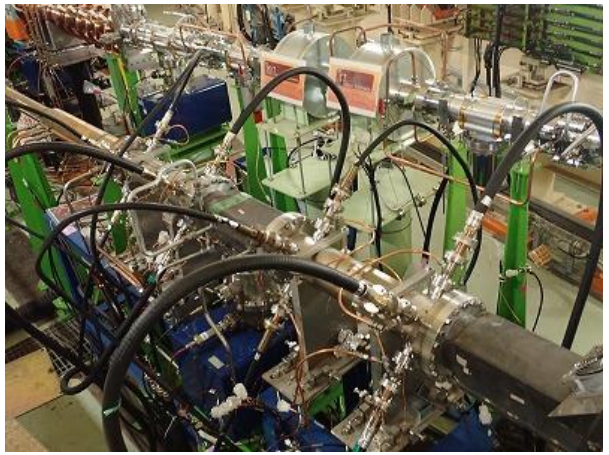


**ビーム電流
を計測する。**

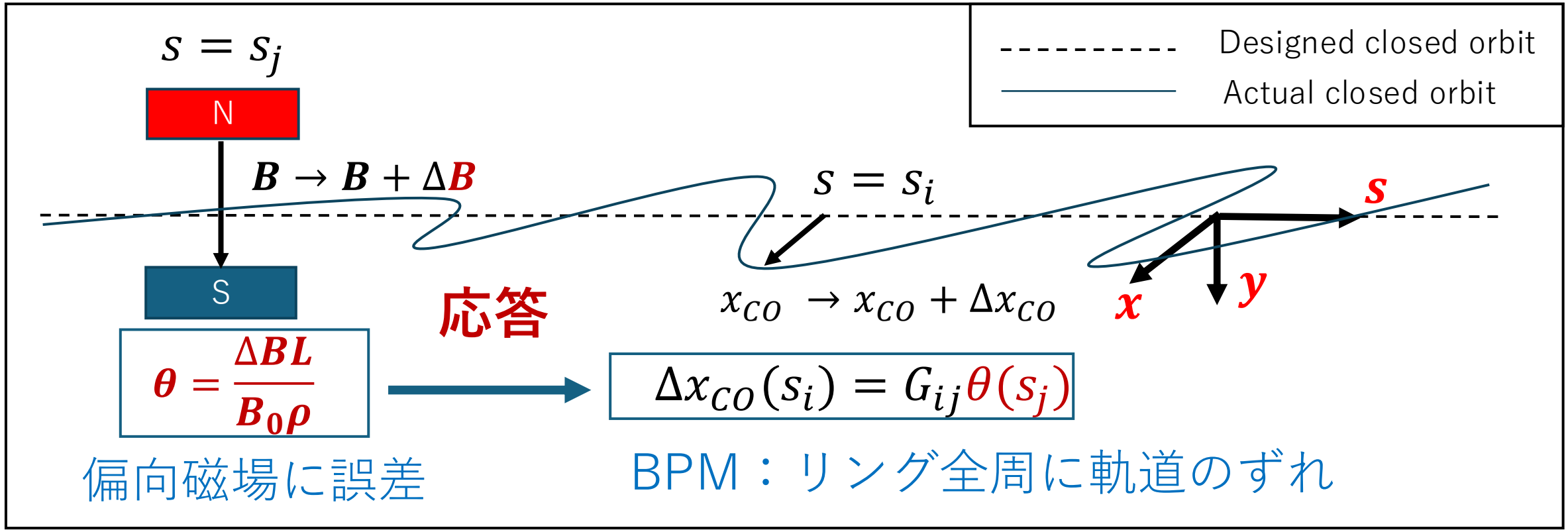
バンチ毎ビームフィードバックシステム



**バンチごとの位置を測定。
ビーム位置をフィードバック。**



ビーム軌道の歪みとその補正



応答行列

$$G_{ij} \equiv \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2 \sin \pi\nu} \cos\left(\pi\nu - |\varphi_i - \varphi_j|\right)$$

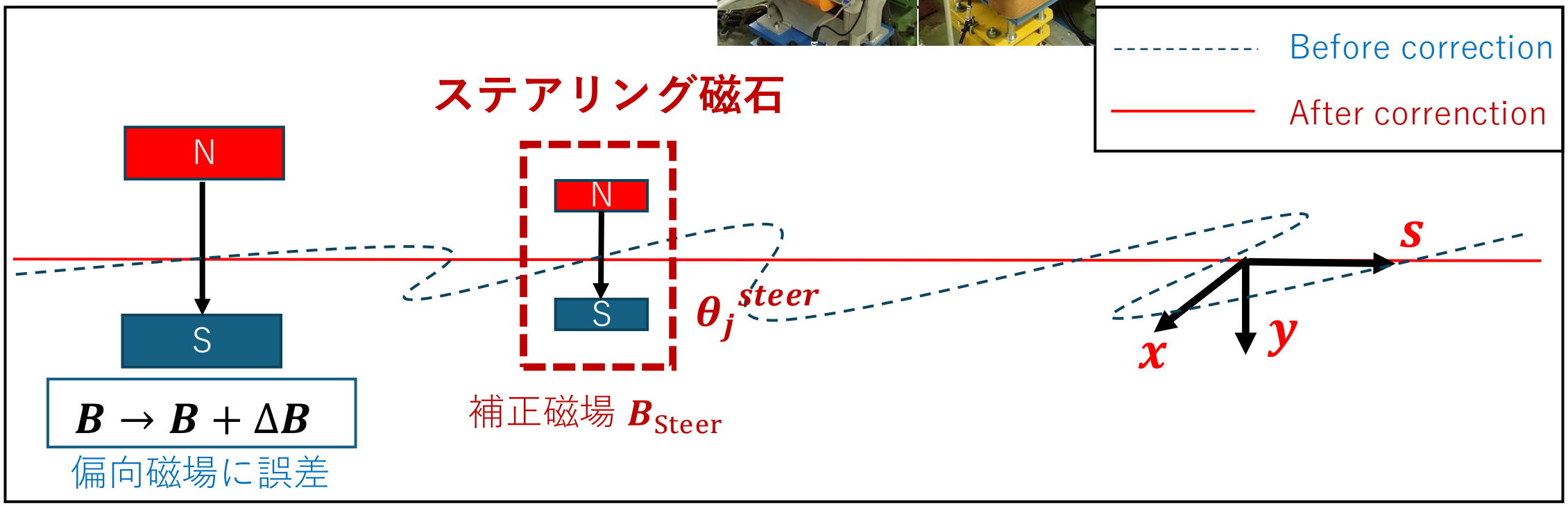
軌道のずれ

$$\Delta x_{co}(s) = \sum_j G_{ij}\,\theta_j$$

軌道補正

小型の補正磁石「ステアリング磁石」

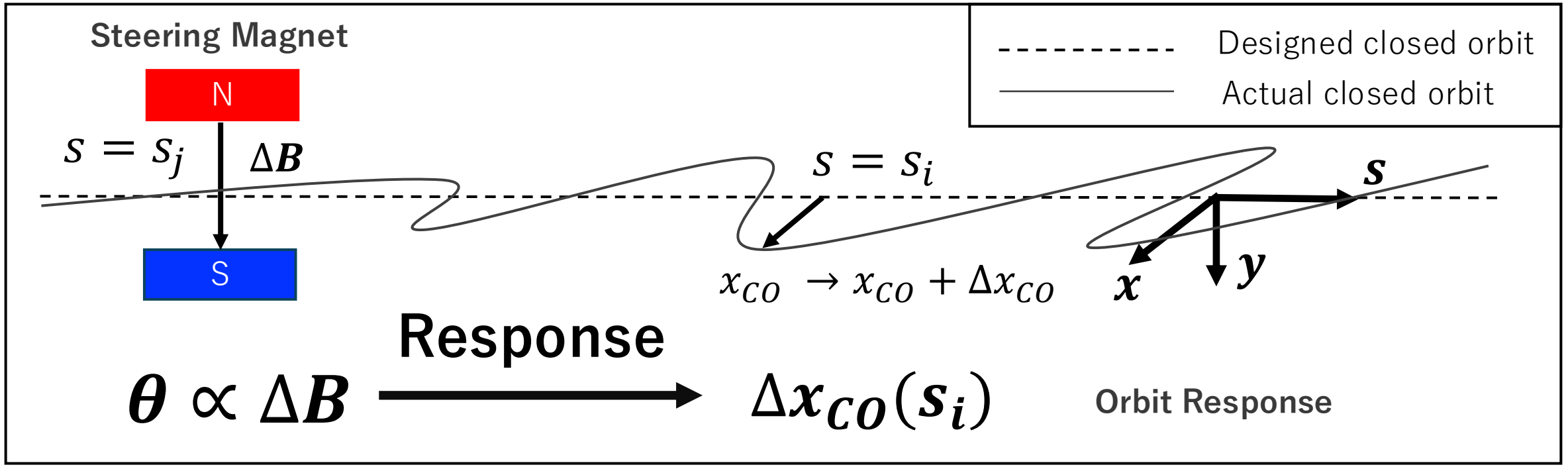




$$\Delta x_i = \sum_j G_{ij}\,\theta_j + \sum_j G_{ij}^{steer}\,\theta_j^{steer}$$ を最小化する。

閉軌道応答の測定

軌道の歪みを意図的に作って観測することで、βなどを評価出来る。



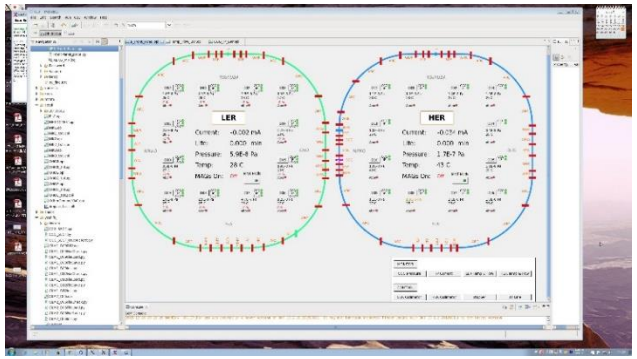
ステアリングの蹴り角を少し変えると、リング全周の軌道が応答する。

この応答がデザインとどのように違うかを評価する事でβなどを評価できる。

加速器制御

様々な機器を操作、監視する必要がある。入出力される信号の数は数万点にのぼる。
SuperKEKBではEPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)を中核とした制御システム。

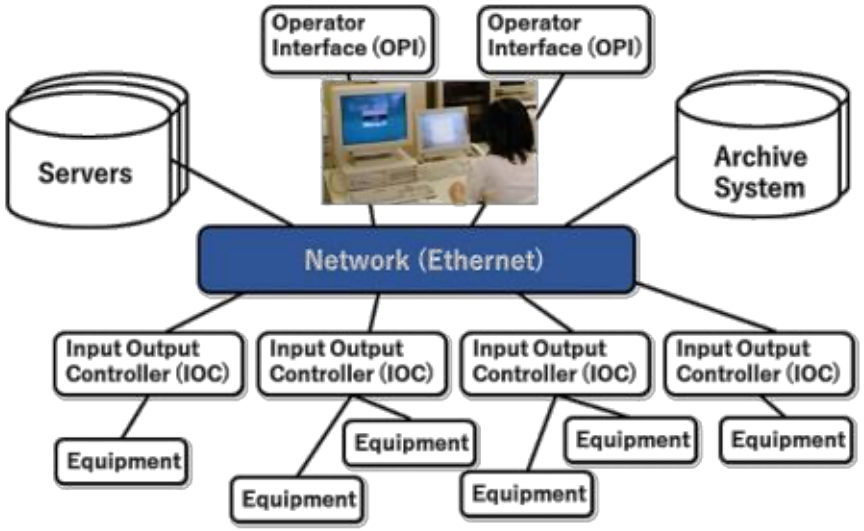
制御・監視用GUI



Local Control Room



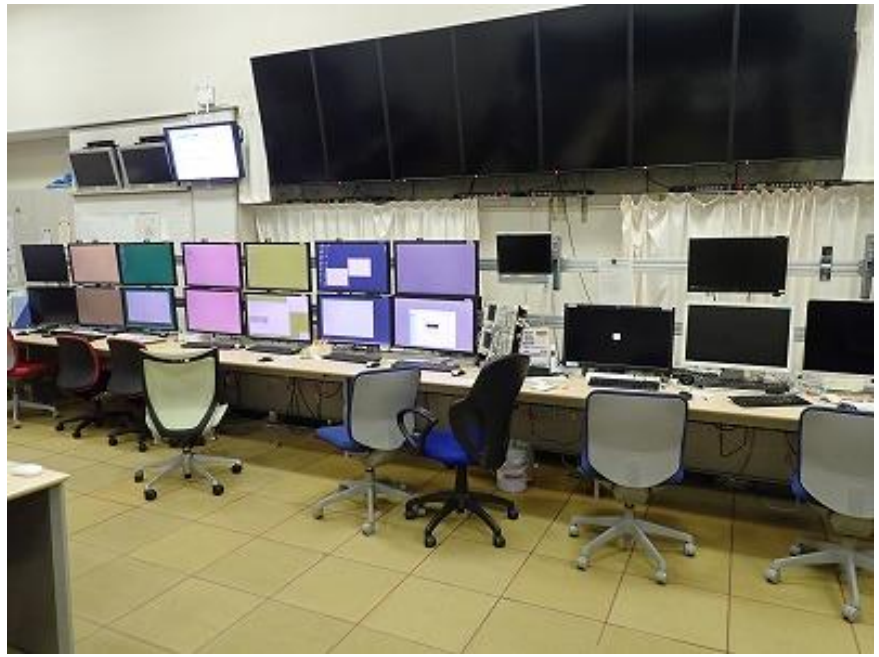
IOCと言われる制御ノードが設置



様々な装置



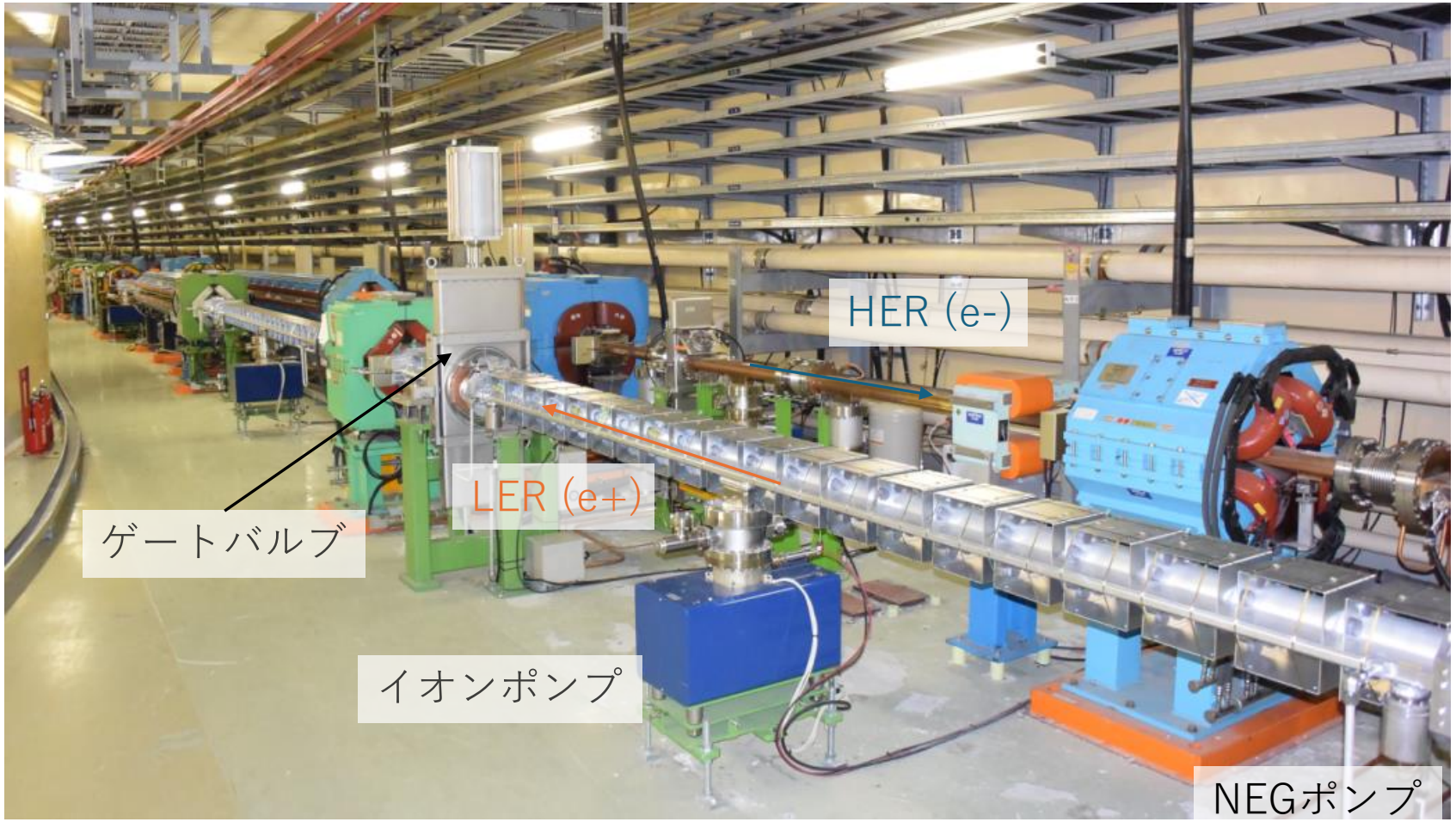
SuperKEKB制御室



ネットワーク越しに全ハードウェアを制御

真空システム

- 残留気体除去のため、ビームパイプ内を超高真空 (~10^{-8} Pa)に保つ。
  - 十分なビーム寿命を保持
  - ビーム不安定性（様々な要因でビームの運動が不安定になる現象）の抑制



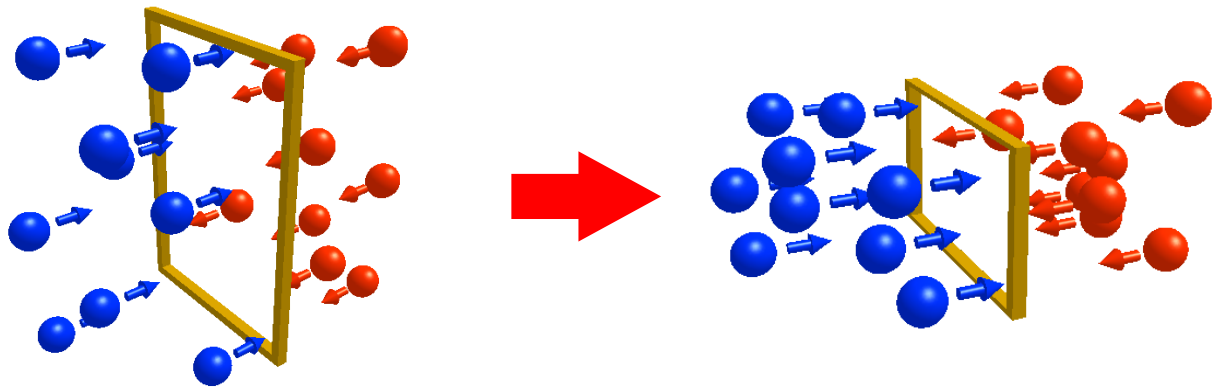
SuperKEKBトンネル内部

Luminosityを高めるには

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

電流

ビームサイズ



1. そもそもビームを安定的に周回させる。
2. **衝突点のビームサイズを絞る。**
3. 大電流ビームの蓄積。

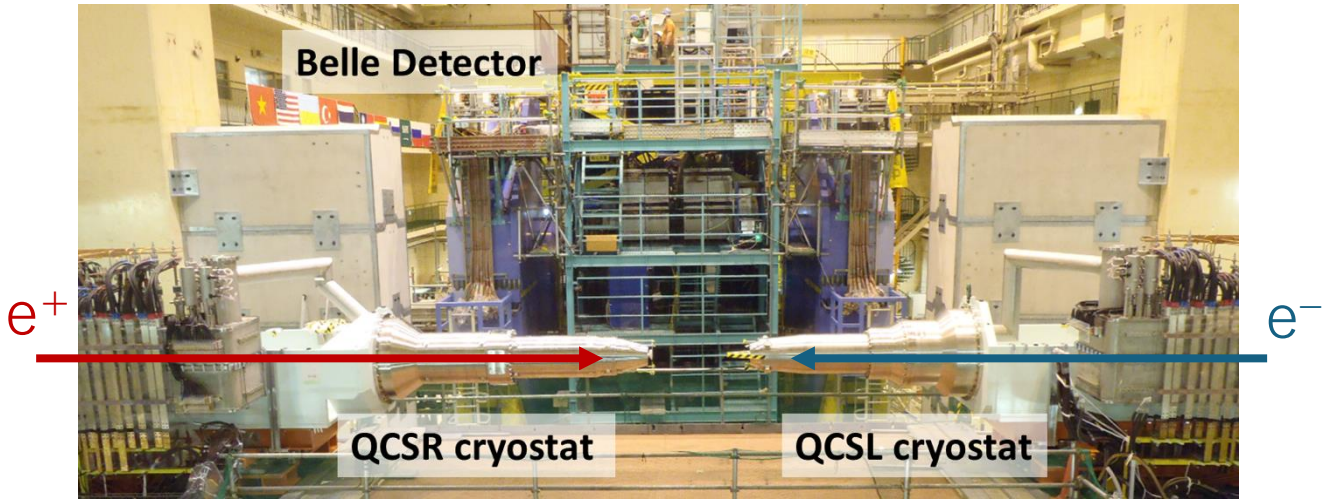
衝突点の最終収束系(QCS)

Quadrupole, Colliding Section, Superconducting

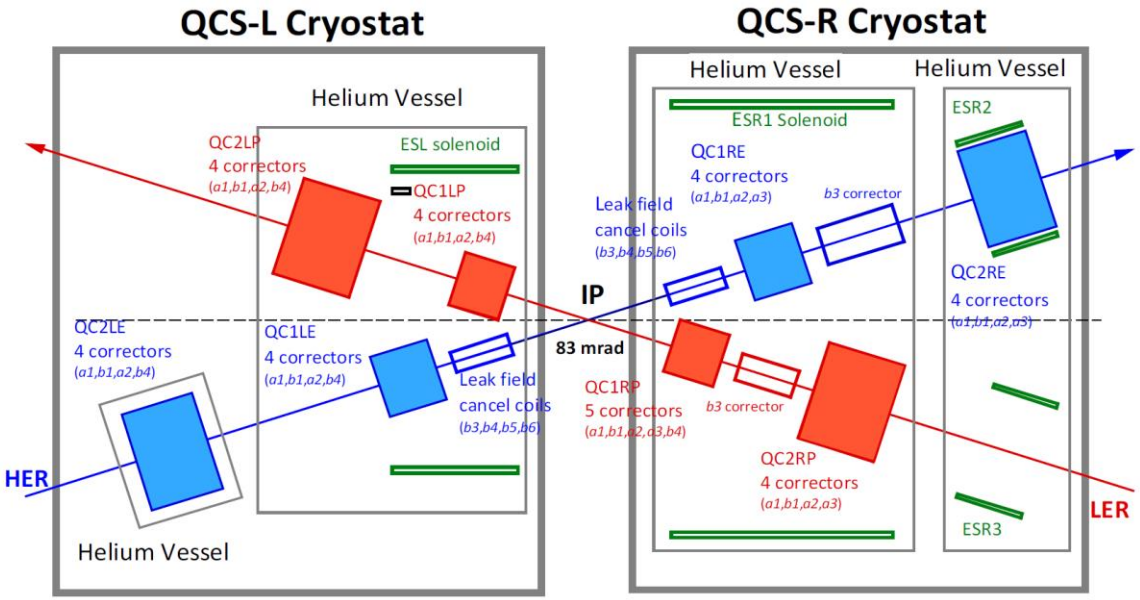
超伝導四極電磁石を中心とした最終収束系で
一気にビームを絞る。

- 四極電磁石：8台
- 補正ソレノイド：4台
- 各種補正電磁石：35台
- 漏れ磁場補正コイル：8台

<ビームサイズ>
水平：20 um
垂直：50 nm

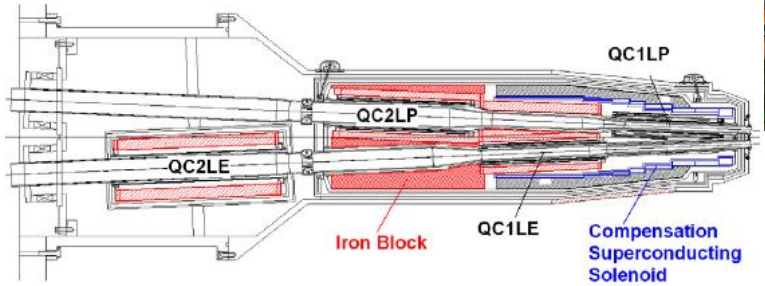


Belle IIインストール前の衝突点



超伝導電磁石を格納するcryostat





ただビームを絞ればいいというわけではない。

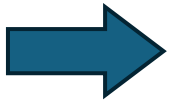
ナノビーム衝突方式

- ビーム収束の副作用：砂時計効果 (hourglass effect)

衝突点近傍（自由空間）の β 関数:

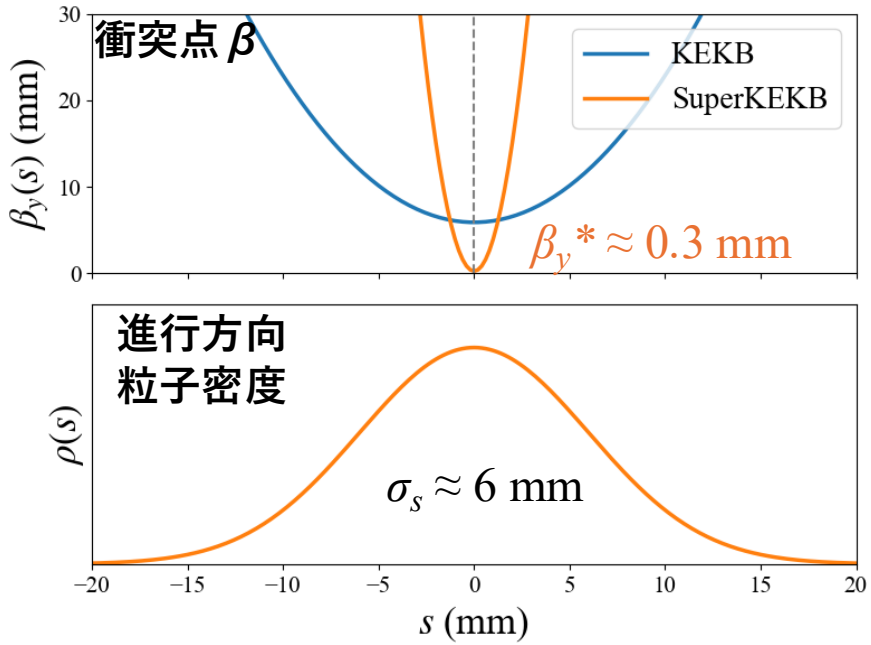
$$\beta(s) = \beta^* \left(1 + \frac{s^2}{\beta^{*2}}\right)$$

β^*: 衝突点での β

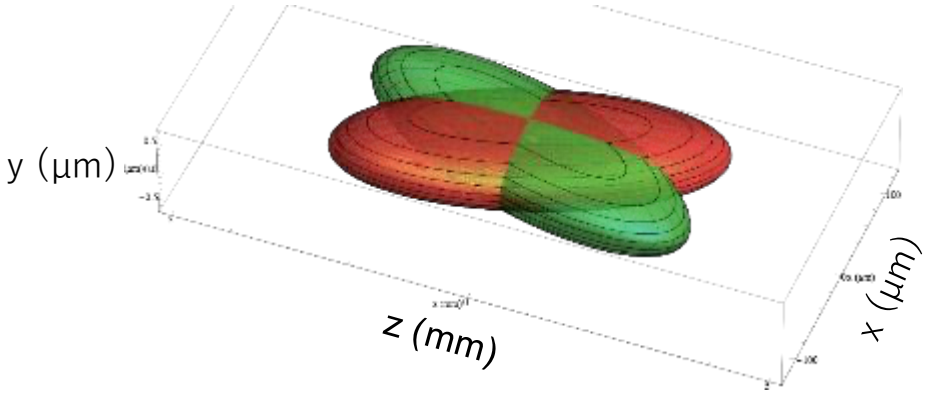


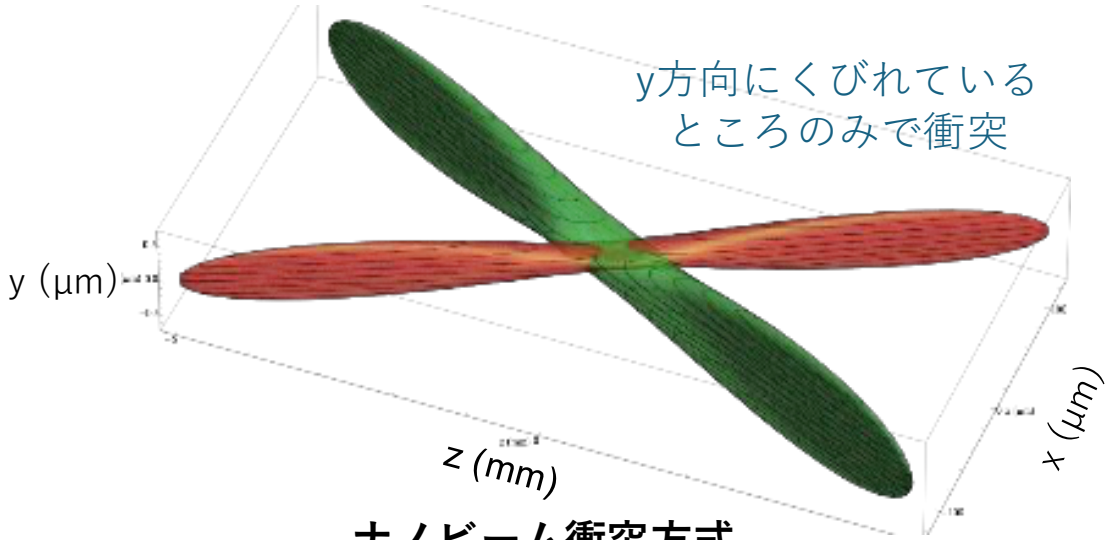
$\beta_y^* \lesssim \sigma_s$ の場合ビームの前後が膨らみ、luminosityに不利

- SuperKEKBでは水平方向に大きな交差角をつけることで砂時計効果の制限を回避 (= nano beam scheme*)



β^*を小さくすると前後が急激に増大
= **砂時計効果**





ナノビーム衝突方式

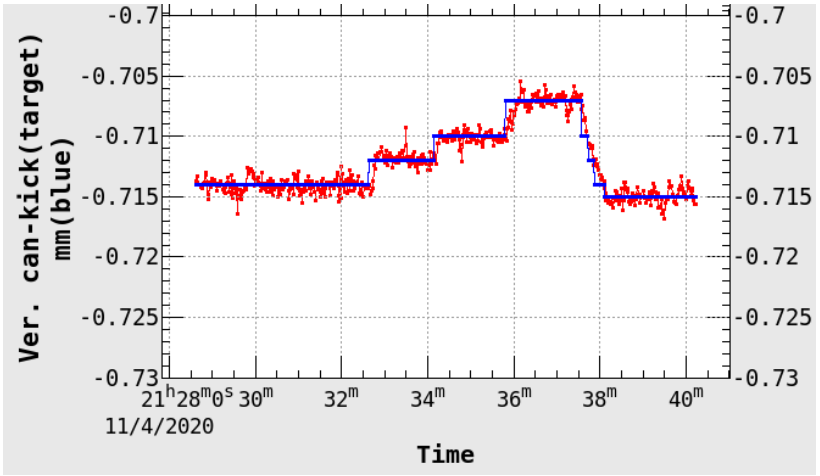
* P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop (2006).

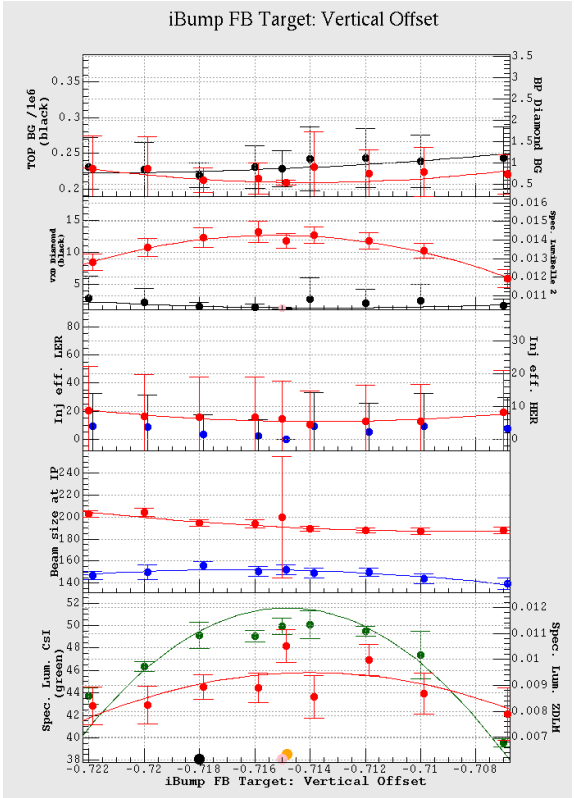
衝突フィードバック制御（iBump）

KEKBから導入されている衝突点垂直方向軌道フィードバックシステム

8台のVertical Steeringと4台のHorizontal Steeringが衝突点付近のHERに設置されている。
BPMの信号をもとに、ステアリング電磁石を操作し、衝突点にバンプ軌道をつくる。

バンプ軌道を動かし、Luminosity
が最大となるように調整する。





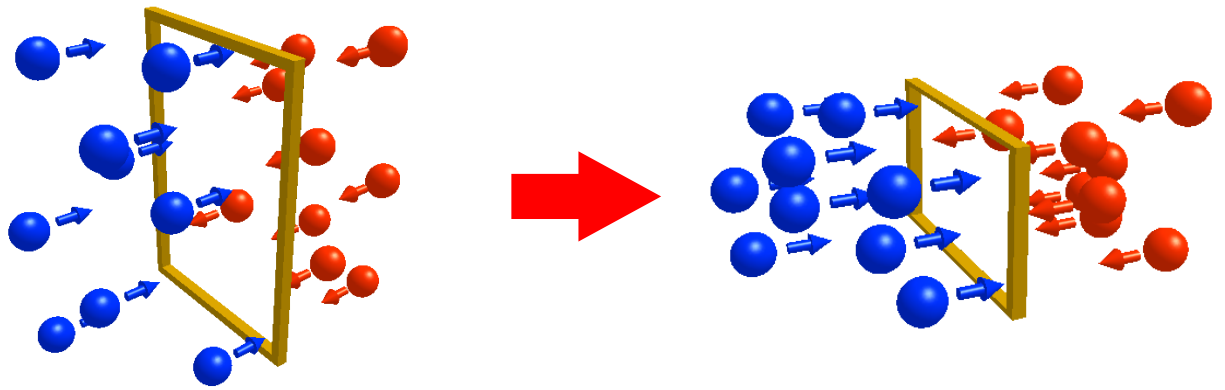


Luminosityを高めるには

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

電流

ビームサイズ



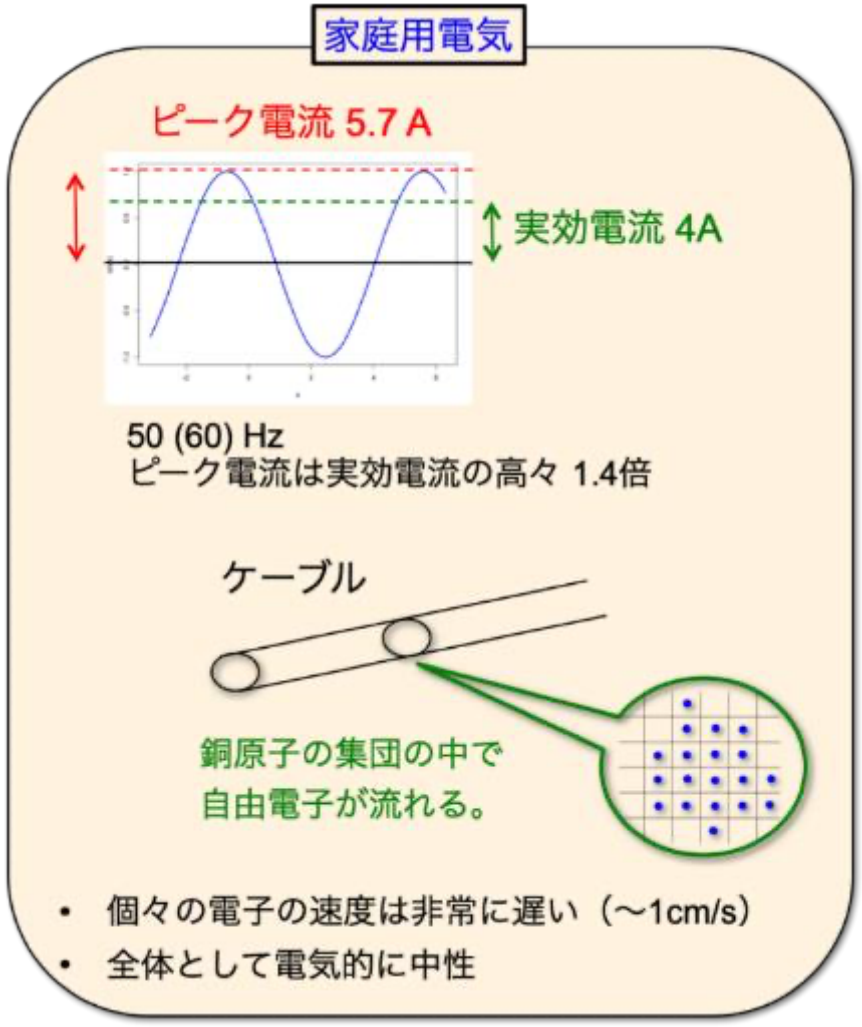
1. そもそもビームを安定的に周回させる。
2. 衝突点のビームサイズを絞る。
3. **大電流ビームの蓄積。**

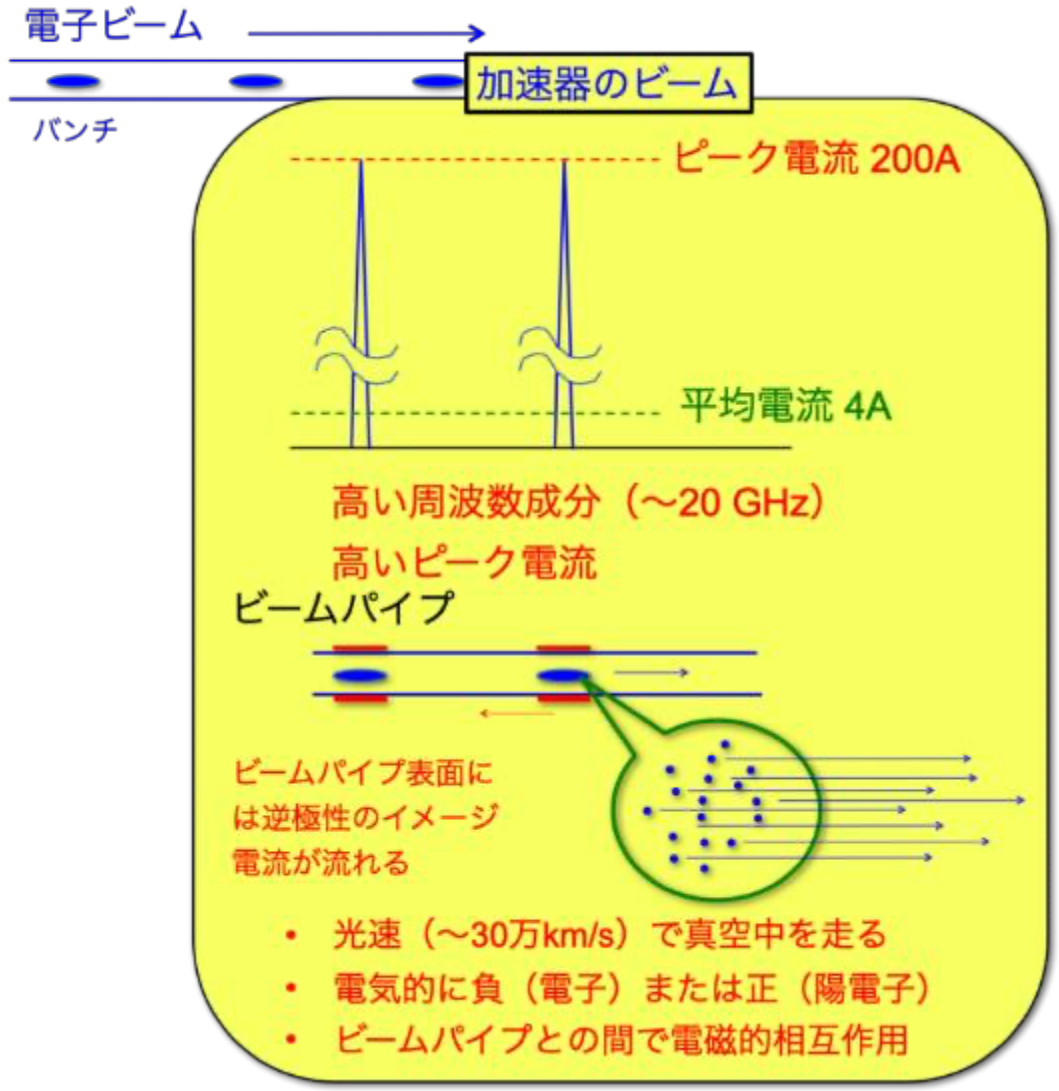
大電流ビームとその難しさ

そもそも3.6 Aは大電流なのか？



家庭用ストーブ





高い周波数：同じスケールの凹凸や隙間に作用

大電流ビームとその難しさ

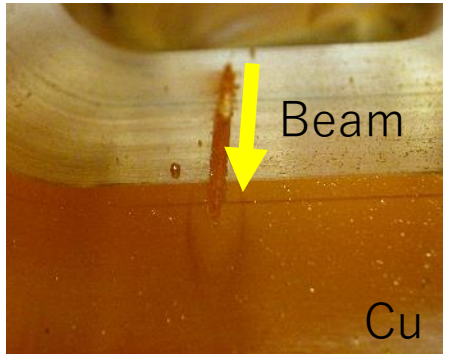
平均 3.6 Aでもピーク電流は200 A　→ **装置破壊に十分な大電流。**

KEKB

破損したベローズのRFシールドフィンガー





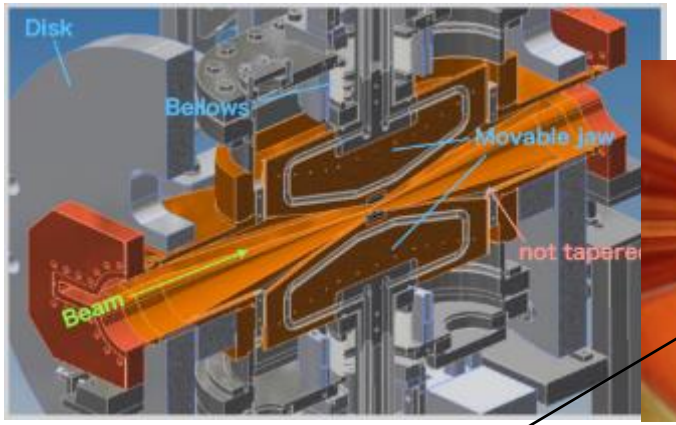


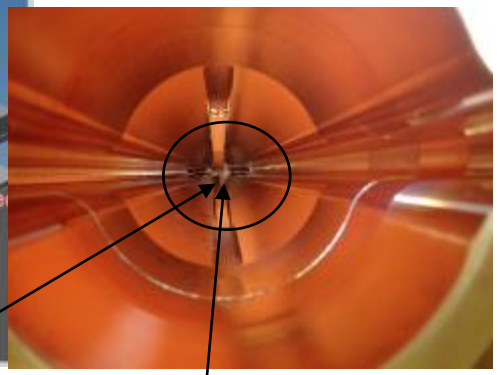
ビームが直接当たると

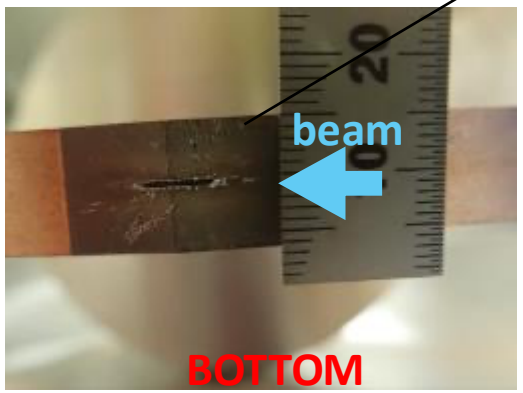
金属部分が融解・気化。

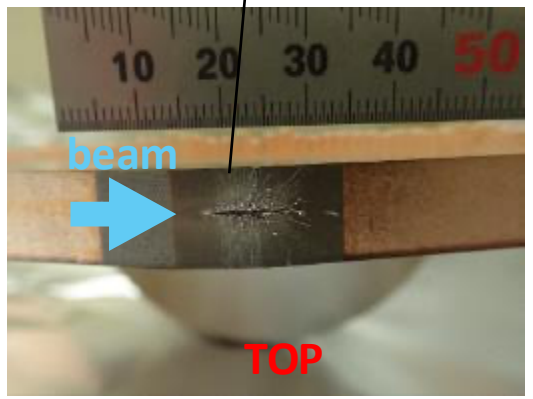
SuperKEKB

Belle II検出器を守るコリメータの損傷









Tantalum (Ta) head with 10 mm long tip

高周波加速空胴

放射減衰を補償。大電流ビーム耐えうる十分なRFパワーを供給する必要がある。２種類の加速空洞を使用。

常伝導加速空胴 (ARES)



509 MHz
~0.5 MV
LER 22台
HER 8台



*ARES: Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage

貯蔵空胴に高周波電力を貯めることで、大電流ビーム加速の反作用を低減する。

超伝導加速空胴

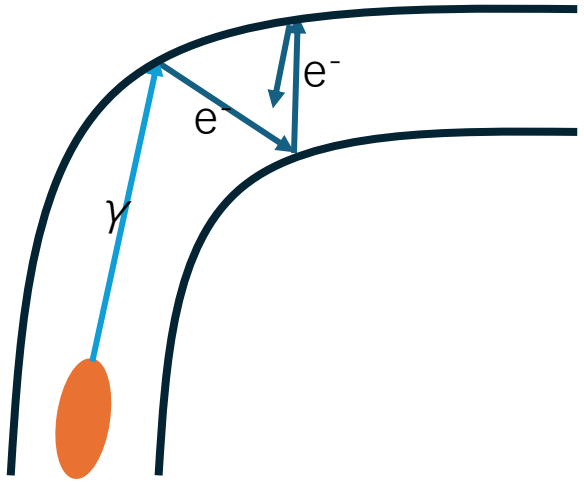


液体ヘリウム温度まで冷却し、Nbを超伝導状態で利用する空胴。

509 MHz
~2 MV
HER 8台

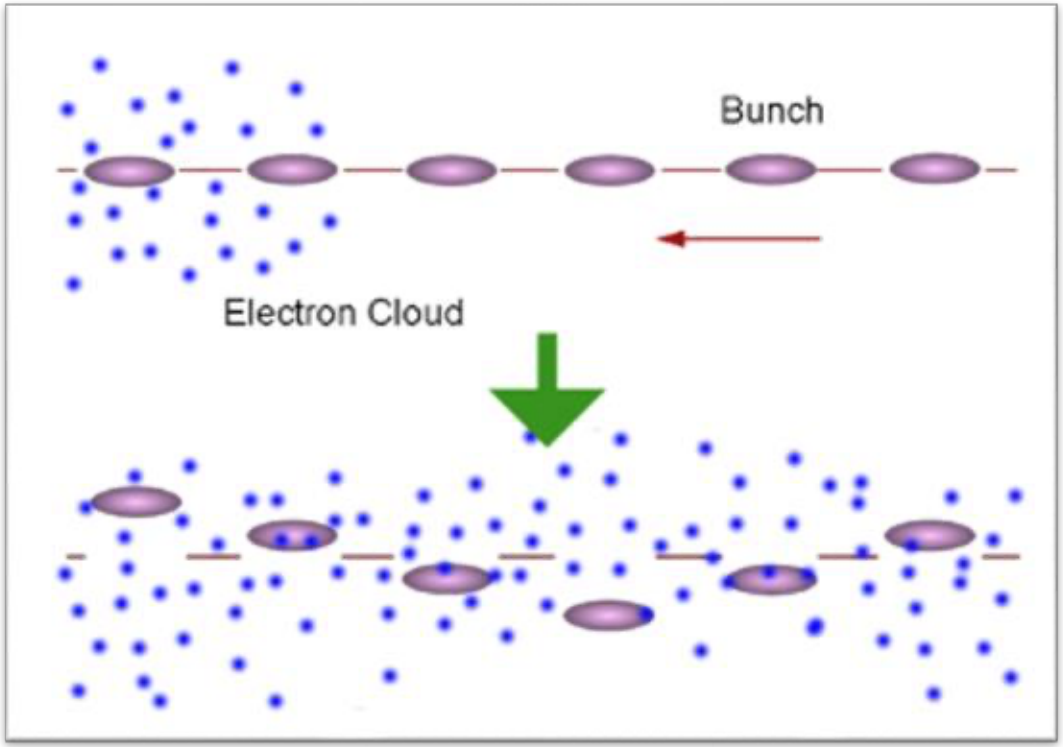


電子雲不安定性

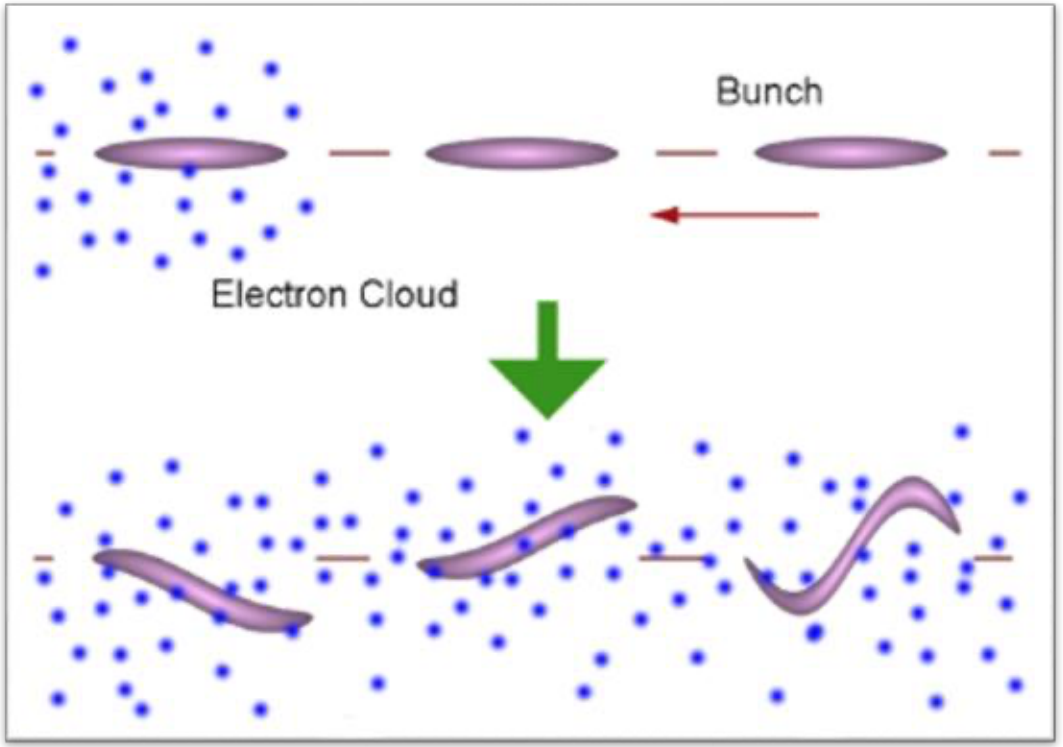


- 放射光で発生した光電子と陽電子ビームとの相互作用
  - 光電子が壁面衝突 → 2次電子 → 3次電子 → … → 電子数の増幅（電子雲）
  - 電子密度がある程度大きくなるとビーム不安定性が発生

バンチ電荷に依存。**ビームサイズが大きくなり、Luminosity低下につながる。**



Multi-bunch instability
（バンチ結合型不安定性）



Single-bunch instability
（Head-tail不安定性）

電子雲不安定性への対処

- KEKB時代から研究が進められ、対処方法が確立

末次氏、第21回日本加速器学会年会 (2024)発表資料より

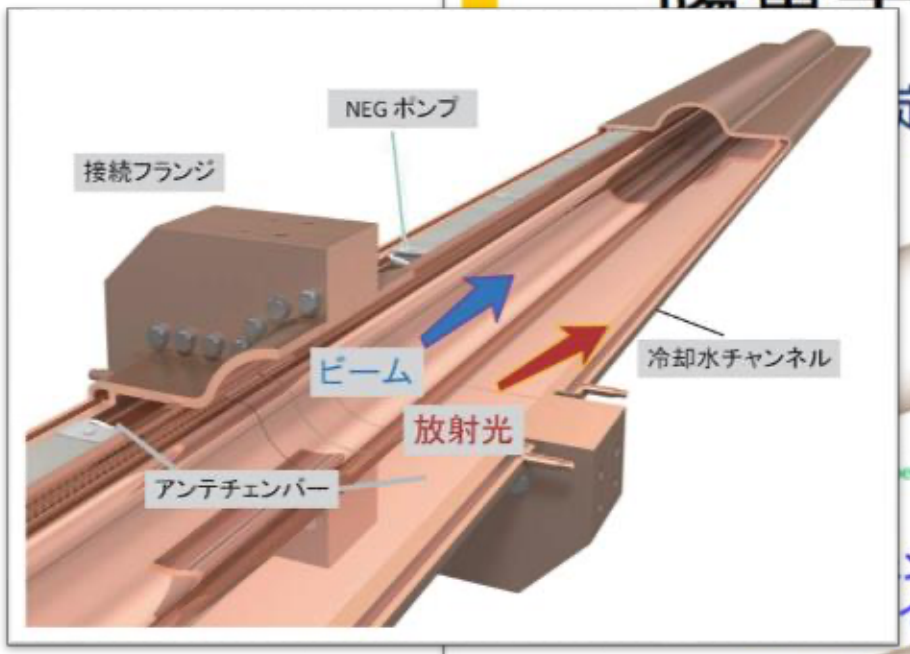


SuperKEKBでの電子雲対策

電子雲不安定性への対処

- KEKB時代から研究が進められ、対処方法が確立

末次氏、第21回日本加速器学会年会 (2024)発表資料より



e+ビーム用アンテチェンバ付ビームパイプ

- 放射光はアンテチェンバに照射
  - ✓ 放射光パワー密度の低減
  - ✓ 放射光で発生する光電子をアンテチェンバ内に閉じ込める

SuperKEKBでの電子雲対策

Sudden Beam Loss (SBL)

- **Sudden Beam Loss (SBL)**: 大電流運転時に前触れなく
  大きなビーム電流を損失する事象

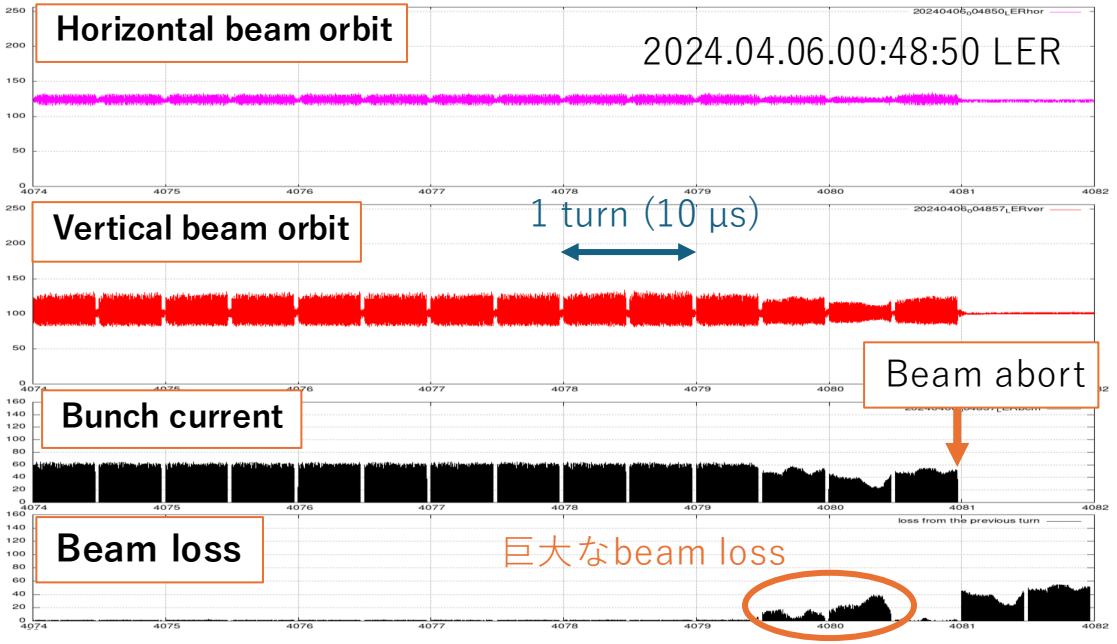
  ➡ コリメータ損傷やQCSのquench（超伝導→常伝導に転移）の原因

✓ Sudden Beam Lossの原因究明のため多くのモニタシステムを開発 →

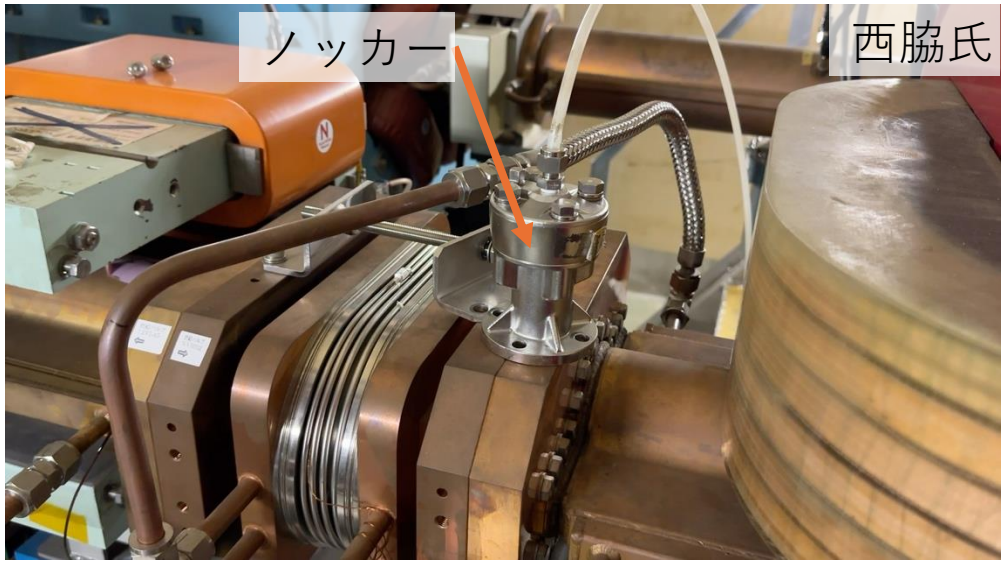
- 考えうる原因: ビームパイプ中のダスト?

  ➡ ノッカー試験を実施（2024年5月–）

  ✓ ビーム運転中にチェンバを叩いて、強制的にダストを落とす実験

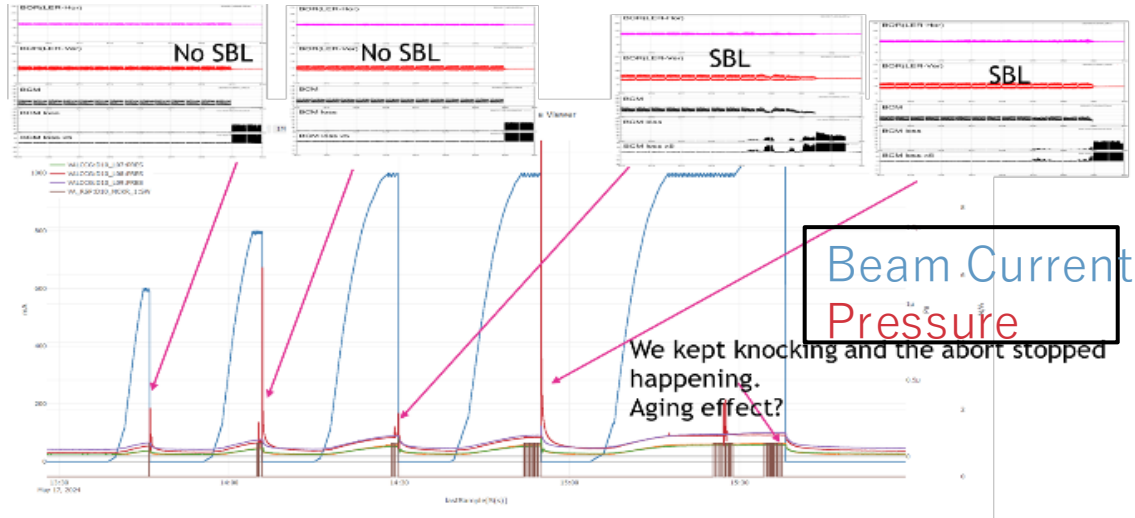


Sudden Beam Loss発生時のバンチ毎の軌道・ビームロス



ノッカー試験

結果 ➡



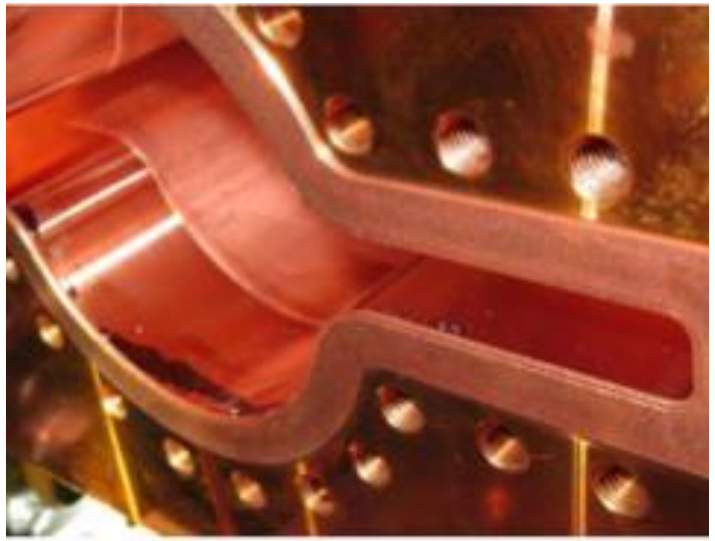
電子雲除去電極付ビームパイプを叩いた結果

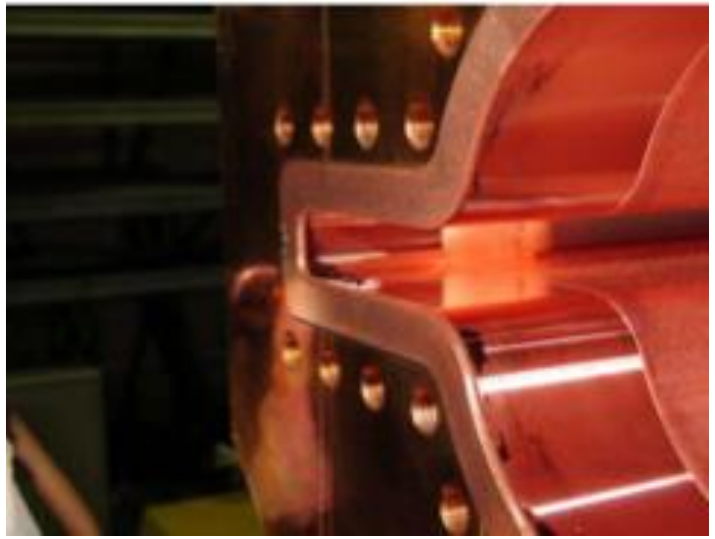
H. Ikeda, Proc. PASJ2024 FRP023 (2024).

人為的にSudden Beam Lossを発生させることに成功

SBL対策の現状

- LERでは、真空漏れが発生した際に、VACSEALを使用していた。
- この真空シール剤（VACSEAL）がチェンバ内に浸透。
- これに起因するダストがSBLの原因になっていた。
- チェンバ内に滲み出たシール剤を洗浄したところ、LERのSBLは激減。
- ただし、未だSBLは残っており、完全解決には至っていない。





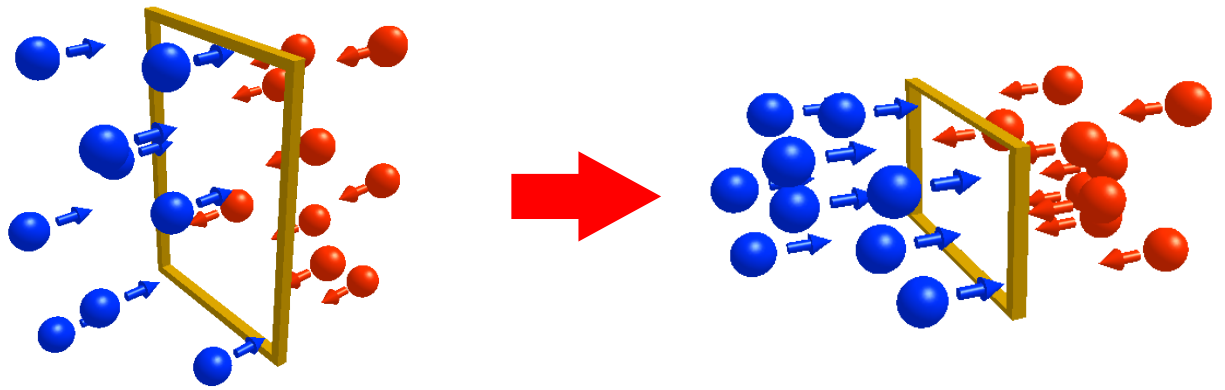
照井氏、加速器全体会議資料（2025年6月）

Luminosityを高めるには

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

電流

ビームサイズ



1. そもそもビームを安定的に周回させる。
2. 衝突点のビームサイズを絞る。
3. 大電流ビームの蓄積。

現在の到達点と問題点は?

Peak luminosityと各パラメータ

	TRISTAN	KEKB @Peak Luminosity			SuperKEKB	
		e^+ LER	e^- HER		e^+ LER	e^- HER
Beam energy [GeV]	25~32	3.5	8.0		**4.0**	**7.0**
Beam current [A]	0.014	1.64	1.19		3.6 **1.6**	2.6 **1.2**
Bunch current [mA]	0.007	1.03	0.75		1.44 **0.80**	1.04 **0.60**
Beta function at IP β_x^*/β_y^* [mm]	1000/40	1200/5.9	1200/5.9		32/0.27 **55/0.9**	25/0.3 **55/0.9**
Beam size at IP σ_x^*/σ_y^* [μm]	250/8	147/0.94	170/0.94		10.1/0.048 **14.8/0.248**	10.7/0.062 **15.9/0.248**
Luminosity x10^{34} [cm^{-2} s^{-1}]	0.0045	2.1		>Two times	60 **5.32**	

Design
Max.Value
as of 2026/6

The smallest value in the world's collider

Demonstrate the nano-beam scheme

2032年からの二年間でIRの光学系・ハードウェアのアップグレードを予定(LS2)。

課題

多くの課題を克服する必要がある。

- Sudden Beam Loss
- リングにおけるエミッタンス増大 (シングルビーム・ビームビーム効果)
- BTにおける入射ビームのエミッタンス増大
- 大電流運転時のspecific luminosityの低下
- 衝突点の軌道ドリフト
- 電流依存の光学の乱れ
- トンネル沈下

etc.

だが、これらはナノビーム方式のとして世界で初めて直面している課題。
新しいアイディアやブレイクスルーが常に求められるフロンティアである。

まとめ

- 加速器とビーム力学の基礎
- SuperKEKBの構成
- SuperKEKBのLuminosity向上のための工夫
  - ビームを安定に周回させるための加速器構成要素
  - Nano beam scheme
  - 大電流運転に特化した真空システムや、不安定性について