

SuperKEKBにおける 陽電子入射ビームのエミッタンス保存

飯田直子、菊池光男、清宮裕二、森隆志、紙谷琢哉、
柿原和久、大越隆夫、榎本收志、荒木田是夫、多和田正文（KEK）

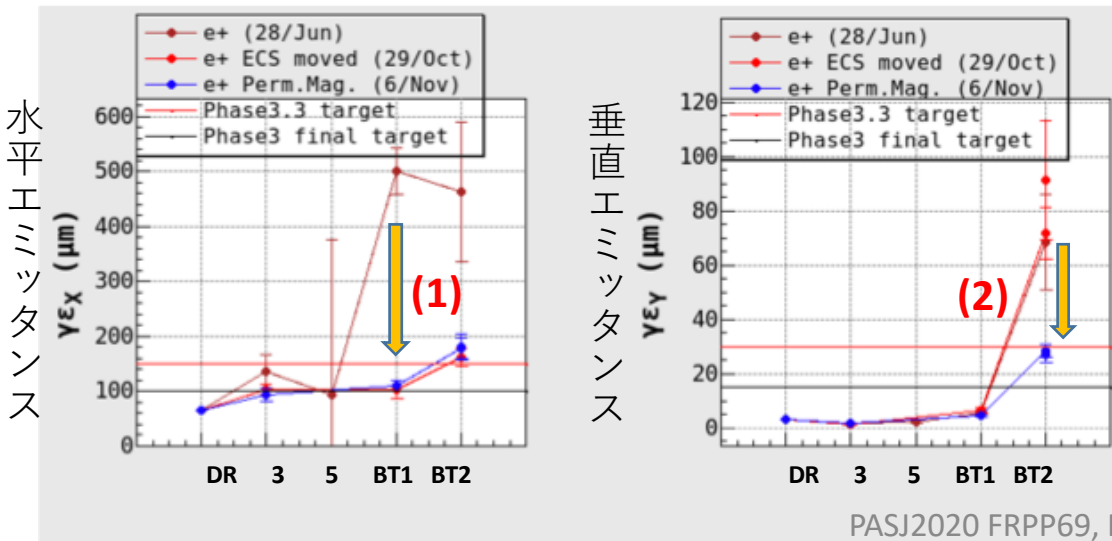
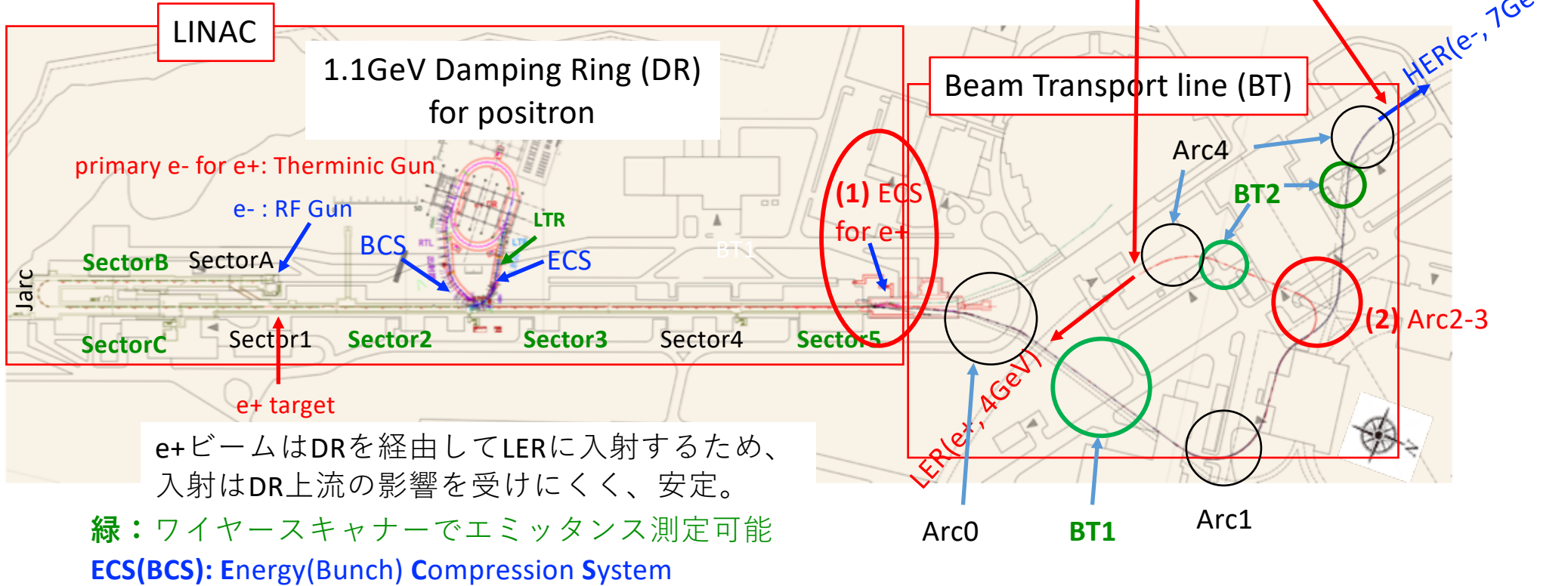
要旨

電子と陽電子のコライダーリングのBファクトリーであるSuperKEKBは、世界最高の記録の約40倍である $8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ のルミノシティを目指している。これを達成するためには、蓄積ビームだけでなく入射ビームも高い電荷と低いエミッタンスを持つことが不可欠である。SuperKEKBからの陽電子入射ビームに最終的に必要な電荷量はバンチ当たり4 nC、水平および垂直のエミッタンスはそれぞれ100 μm および15 μm である。

1.1 GeVダンピングリングを経由して減衰された後の低エミッタンス陽電子ビームは、バンチ圧縮システムおよびエネルギー圧縮システムを備えた4つのアークセクションを持つビーム輸送ラインを経由してインジェクターLINACに戻される。10 μm オーダーのエミッタンスを維持するためにビームを輸送することはそれほど簡単ではない。圧縮空洞でのアークとシケインによって生成される分散を制御し、アークにおけるX-Y結合を減らすことが不可欠となる。現在、測定された約1 nCビームのエミッタンスは、水平方向で450 μm から150 μm に、垂直方向で70 μm から30 μm に減少させることに成功した。

この論文は、陽電子ビームのエミッタンス増大の補正について報告する。

はじめに



世界最高ルミノシティを達成したSuperKEKBは世界初のナノビームスキームを採用しているため、力学口径が狭く入射ビームに要求される電荷量は大きくエミッタンスは小さい。

(1) 5セクター→BT1で水平エミッタンスが、
(2) BT1→BT2で垂直エミッタンスが、
 各々爆発していた。

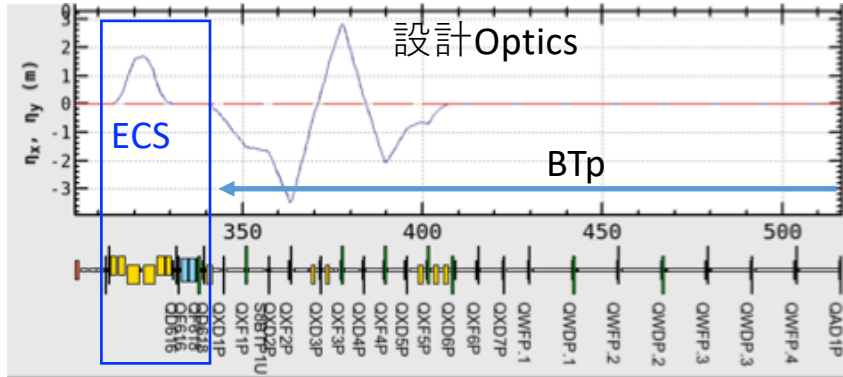
本件は、水平、垂直各エミッタンスの爆発の抑制について発表する。

(1) 水平エミッタンス爆発の抑制

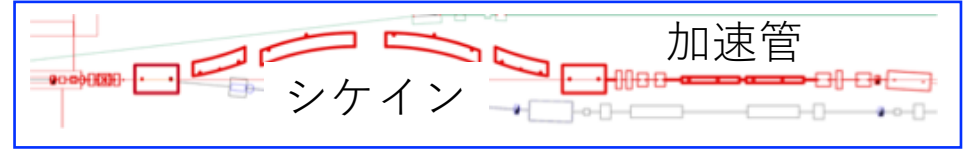
ゼロクロス加速管に分散が存在する事によってバンチの前後で加速が異なり、その結果水平エミッタンス爆発が起こる。

→ LINAC終端のECSで、水平エミッタンスが増大していた。

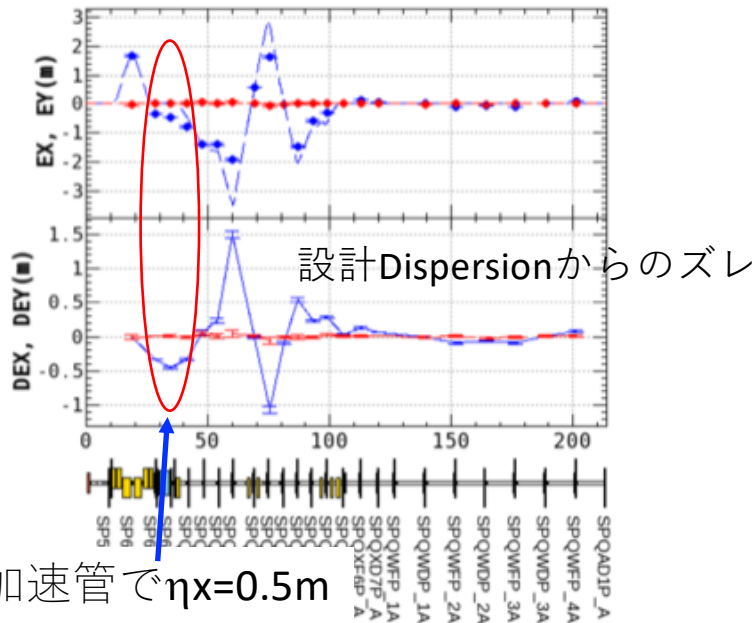
ECS: シケイン+ゼロクロス加速管



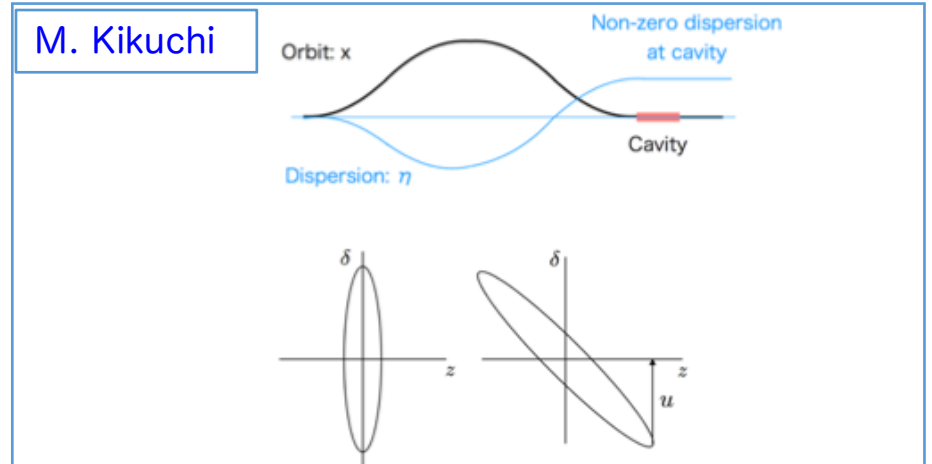
設計上、加速管でのDispersionは0。



測定Dispersion (Y. Seimiya)



ECS加速管で $\eta_x=0.5m$



ゼロクロス加速管に分散があると、Z-X相関が発生し射影エミッタンスが増大する。

$$\bar{\epsilon}^2 = \epsilon_0^2 + \epsilon_0 (\beta\eta'^2 + 2\alpha\eta\eta' + \gamma\eta^2) \langle u^2 \rangle$$

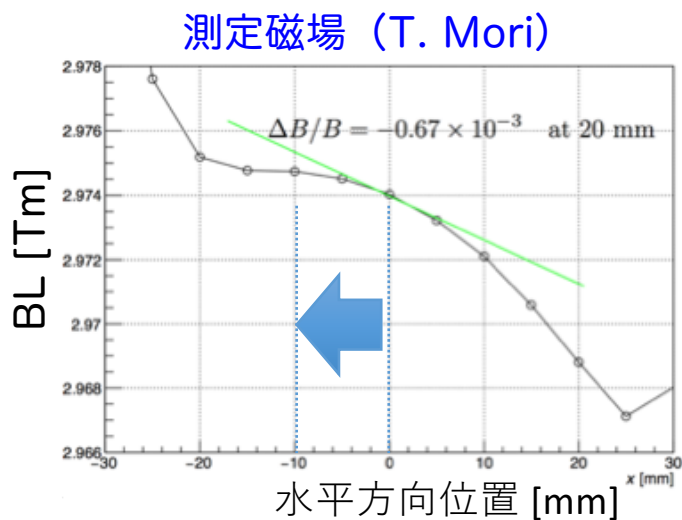
$$u = -vz \quad v = \frac{eV \omega_{rf}}{E_0 c}$$

このECSの場合のシミュレーションでは、

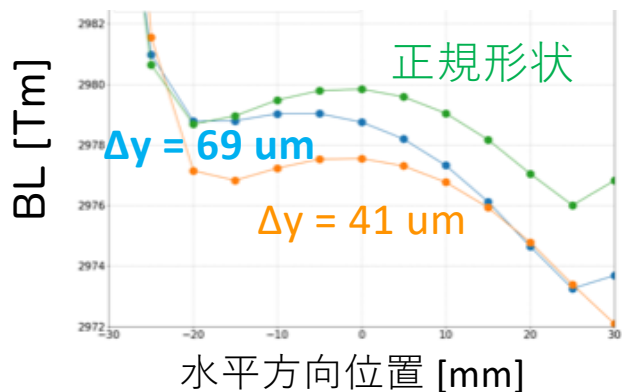
$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \sim 5.6$$

なぜシケインからDispersionが漏れたか？

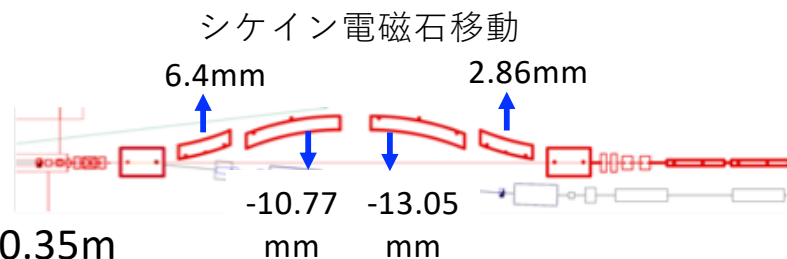
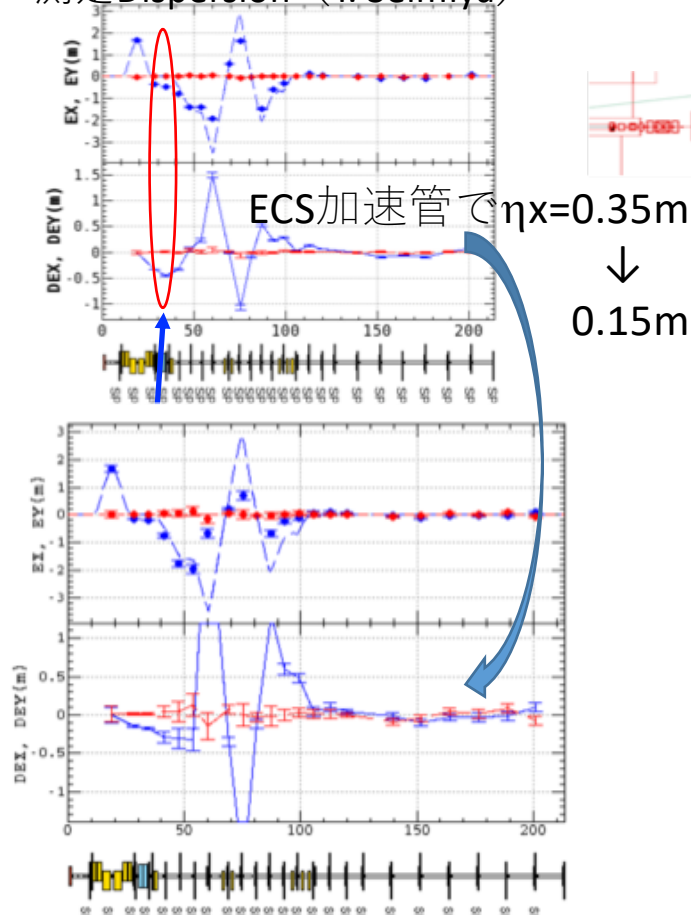
- シケイン偏向電磁石磁場に無視できない多極成分があった。
 - この多極成分磁場は、偏向電磁石がC型磁石で且つ、ギャップが20mmと狭く磁場が強いために磁場をかけた状態で磁極間距離が縮んでしまったために起こった。
 - 入射ビームエミッタンスが一桁大きかったKEKB時代にはエミッタンスが大きいため、シケインで漏れた分散によるエミッタンスは無視できたが、SuperKEKBの入射ビームに対しては要求値を超えてしまった。
 - 偏向電磁石の水平方向に約10mmずれた位置に磁場の多極成分が小さい領域があったため、磁石のみを移動させて多極成分磁場の影響を小さく抑えた。



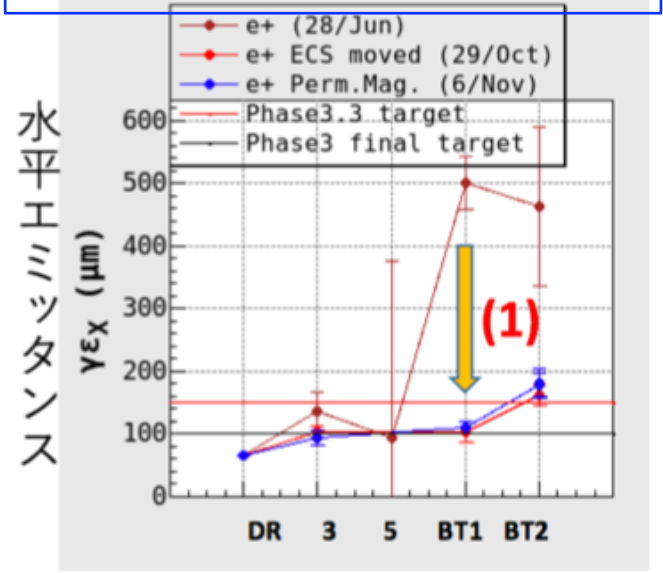
C型偏向電磁石歪みから計算した磁場シミュレーション (T. Kamitani, A. Enomoto)



測定Dispersion (Y. Seimiya)

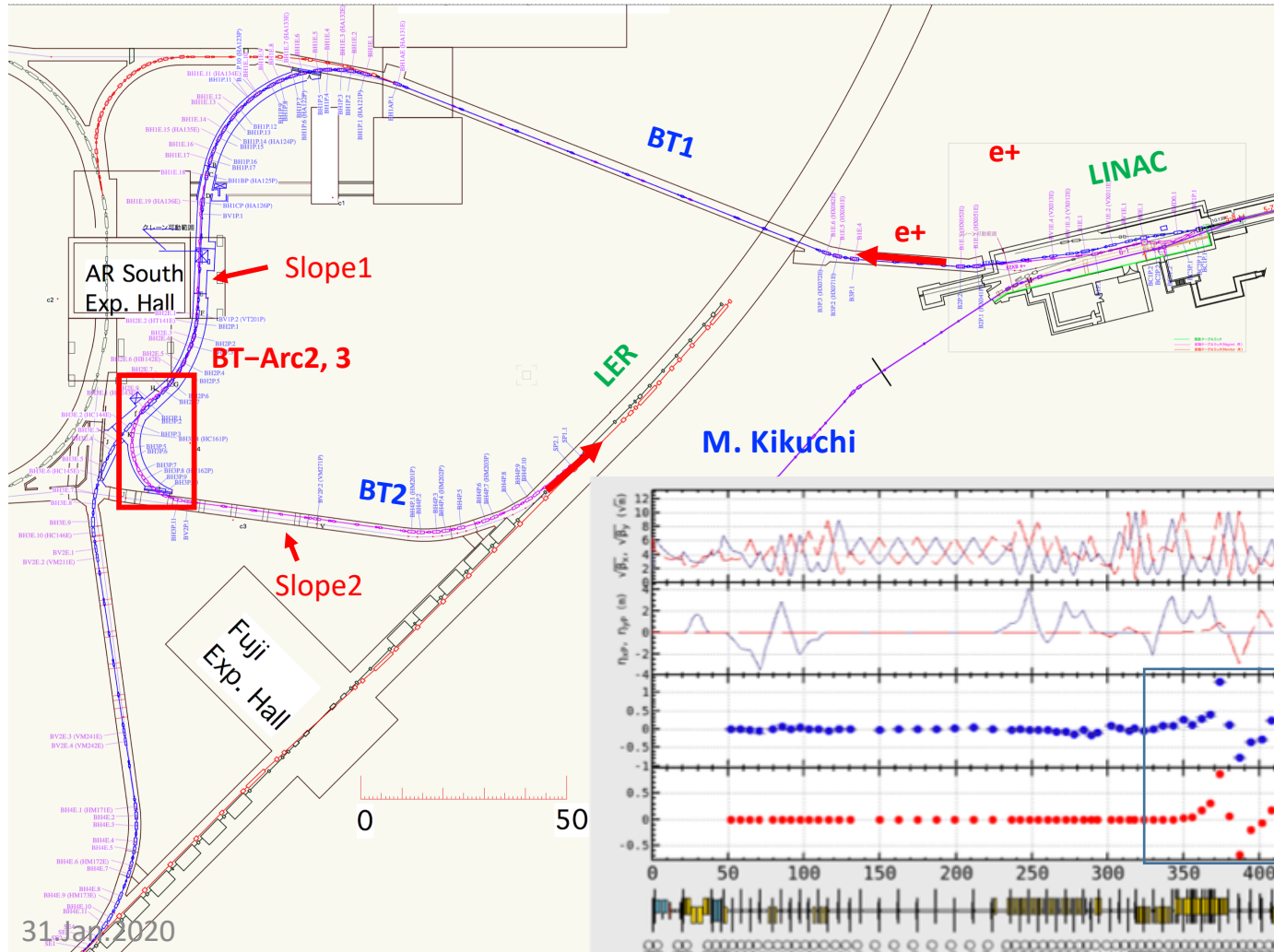


水平規格化エミッタンスが500 μm から100 μm に小さくなった。シミュレーションとほぼ一致。

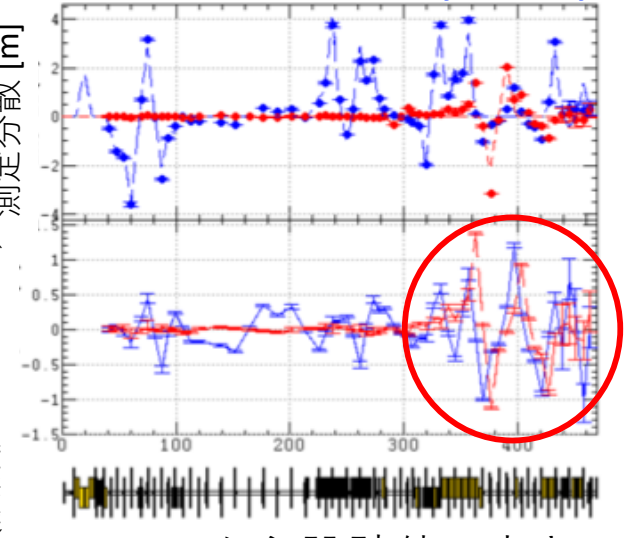


(2) 垂直エミッタンス爆発の抑制

Measured by Y. Seimiya



測定分散 [m]
測定分散からのズレ
(設計値からのズレ)



BT-Arc3から設計外の大きな垂直分散が観測された。

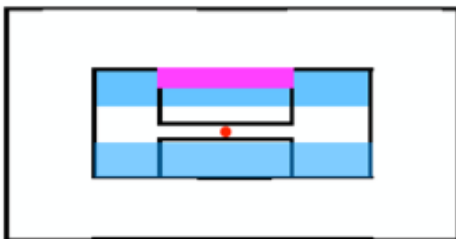
↓ 再現している

測定垂直分散

Arc3のBend両端にSkewQを仮定した場合の垂直分散

必要なSkew-Qの強さ：
Arc-2 : $B'l=0.0097$ [T]
Arc-3 : $B'l=0.0147$ [T]

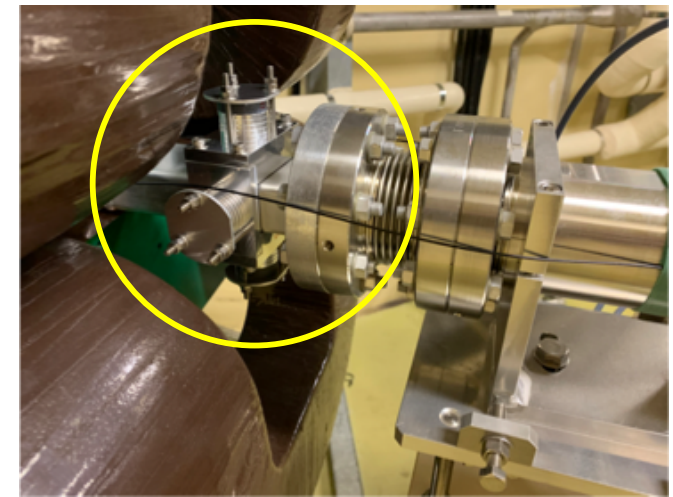
Gap40mmの上部に6mmの鉄板を挟んだ。



e+ビームのエネルギーが4 GeVが上がったことにより、BendのGapを狭くすることで磁場を強くした。Gap上部にのみ板を挟んだため、ビームに対してコイルは上下非対称となり、端部でのコイルによる磁場に異常なSkew Quad成分が発生したと推測される(M. Tawada)。磁場計算から求められるSkew Quad成分は観測値の1/3であるが、補正を試みた。

Skew Quad設置

M. Kikuchi



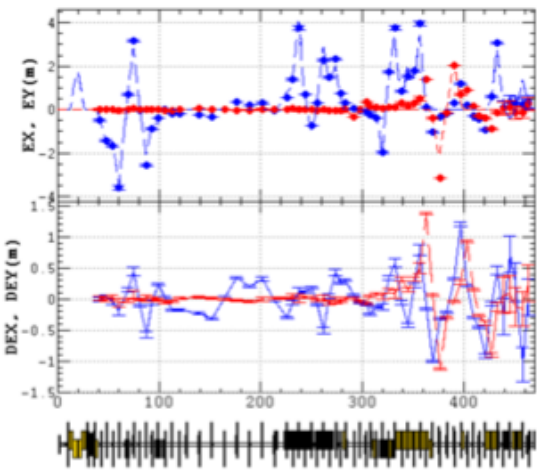
強さ B_0 、半径 a の円形永久磁石を使って、ポア半径 b の四極磁石を作る。

$$B'\ell = 8B_0 \frac{a^3}{(a^2 + b^2)^{3/2}}$$

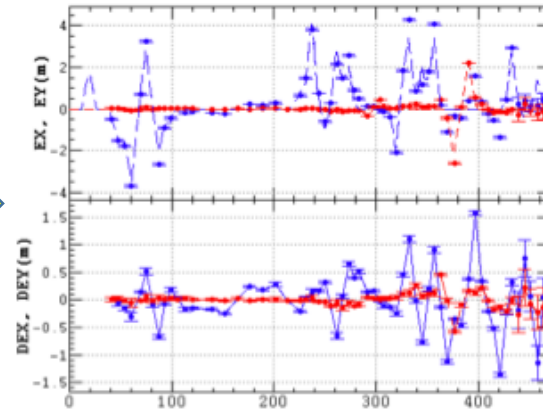
永久磁石：
磁場強さ 1kG、半径 15mm、厚さ 8mm

Skew Quad:
ポア半径=60mm(Arc-2)、
51mm for singlet,
39mm for doublet

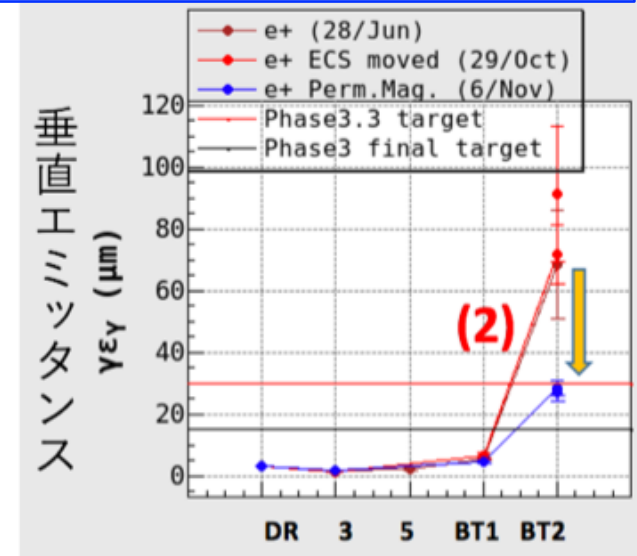
① Before installation of skew quads



② After installation of skew quads



Y. Seimiya



まとめと今後

- SuperKEKBの4GeV陽電子リング(LER)への入射エミッタンスを改善した。
 - Phase 3でのLERからの要求エミッタンスをほぼ達成した。
- 水平エミッタンス
 - ECSシケインからの漏れ分散がECSゼロクロス加速管に及んだため、シンクロベータカップリングが原因でエミッタンス爆発が起こっていた。
 - 分散の漏れはシケインのC型偏向電磁石が磁場によって磁極が変形したために起こっていたが、ビームが磁場の一様性の良い場所を通るように磁石を移動することで漏れを約1/3に抑え、エミッタンス爆発が収まった。
 - ECSゼロクロス加速管での水平分散の漏れはまだ完全にゼロではない。今後はこれを閉じさせるため、シケイン中央に補正Quadの設置等を検討している。
- 垂直エミッタンス
 - BT Arc2, 3で予期しない垂直分散が観測され、これがエミッタンス増大の原因と推測された。
 - KEKBからSuperKEKBへの移行で、陽電子ビームのエネルギーを、3.5GeVから4GeVと高くしたが、この時にArc2, 3の偏向電磁石のGapに鉄板を挟んだため、Skew Quad成分が発生した。
 - これを補正するために永久磁石で作ったSkew Quadを偏向電磁石の両端に設置した(16台中11台)ところ、垂直方向分散関数を補正することができ、BT2での垂直エミッタンス増大が治まった。
 - 今後、残りのSkew Quadを設置予定。