



SuperKEKB加速器における入射ビームロス機構の研究

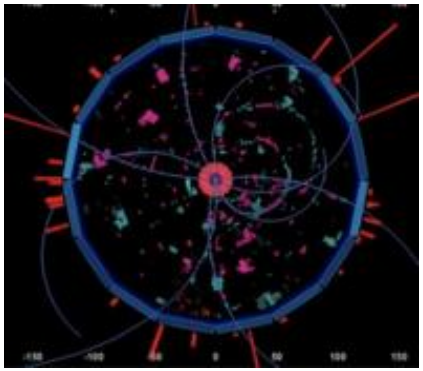
東京大学後田研究室修士2年

根本 貴大

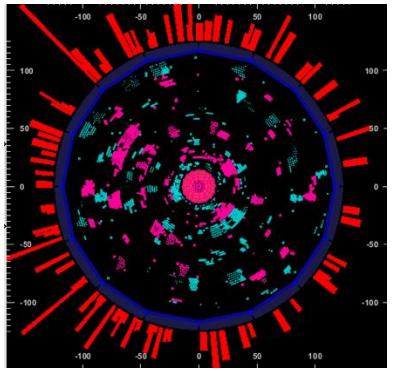


入射ビームロス事象

- SuperKEKBではトップアップ入射方式を採用
- 入射ビームがパイプなどに当たることで大量の放射線が発生(入射BG)



通常時



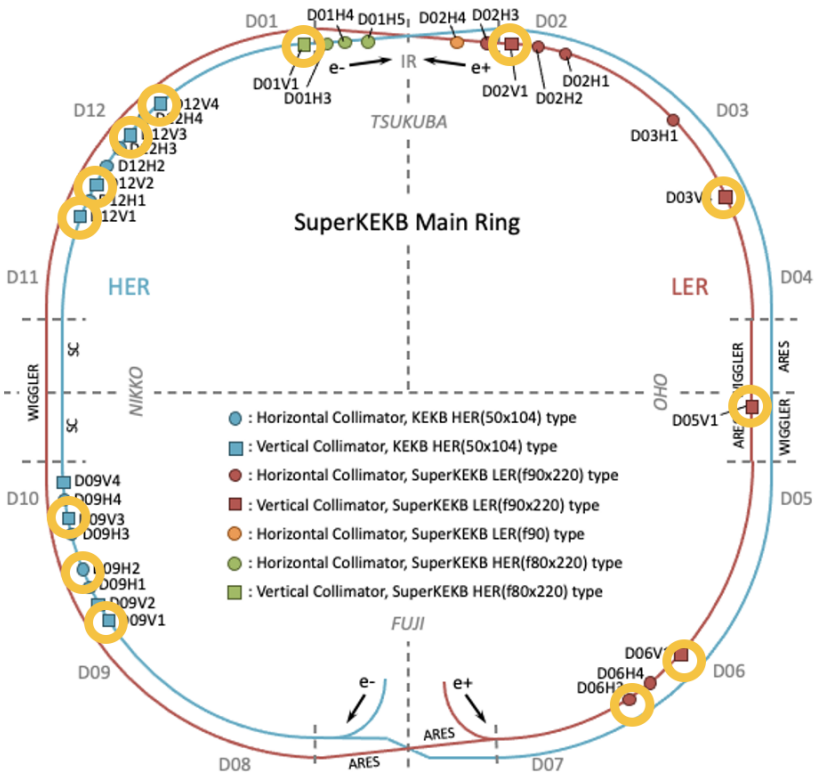
入射直後

<課題>
- 測定器の放射線耐性に迫るため、さらなる高電流化ができない
- 入射veto由来のDAQデッドタイムにより積分ルミノシティの損失
  2026年の運転においては6.8%

<アプローチ>
- 衝突点での入射BGの削減にはコリメータ調整が重要
- 入射ビームロス事象は発生機構がよく分かっていない

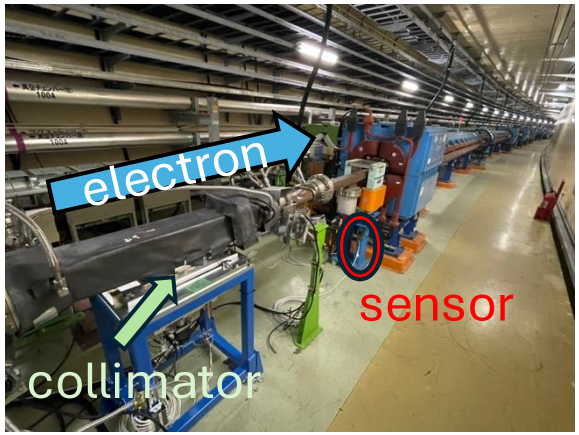
→入射ビームロスに特化した測定システムを開発
→シミュレーションとの比較により入射ビームロスの発生機構を解明

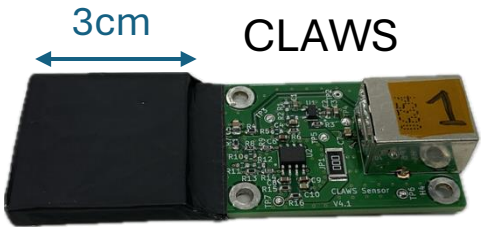
入射ビームロス測定システム



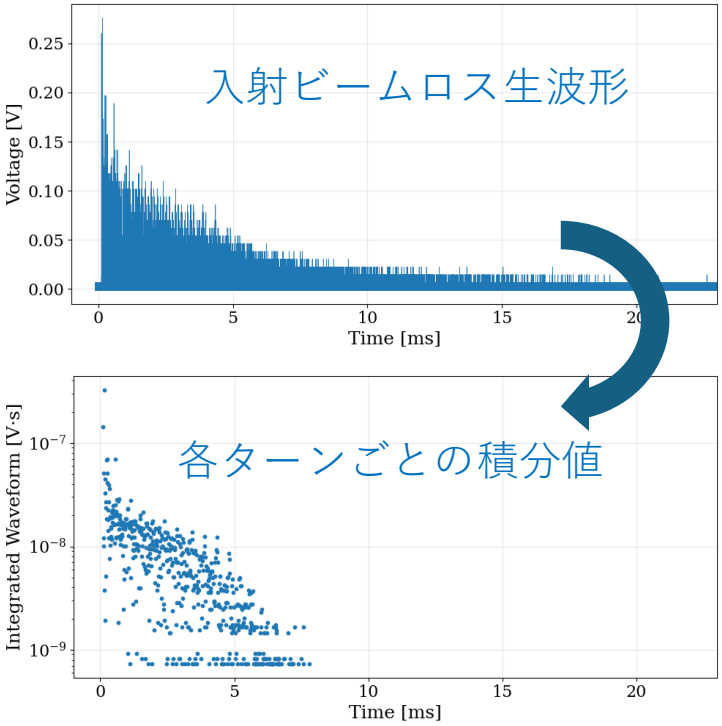
o install position

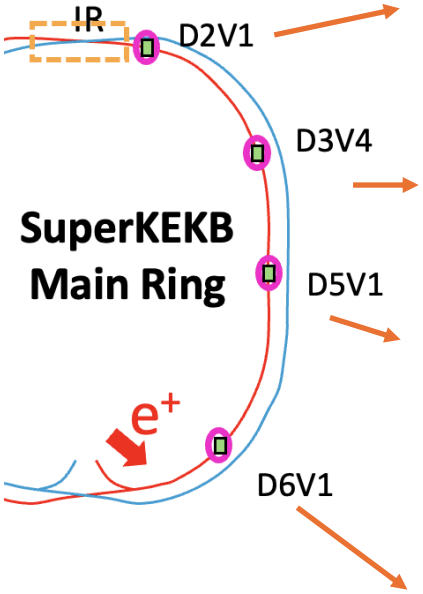
- CLAWSによって各コリメータでの入射ビームロス量を測定
  - プラスチックシンチレータ + MPPC
  - 高時間分解能 (~10ns)
- 1Hzの入射キッカー信号でCLAWS信号をトリガーし、23ms間のデータを取得

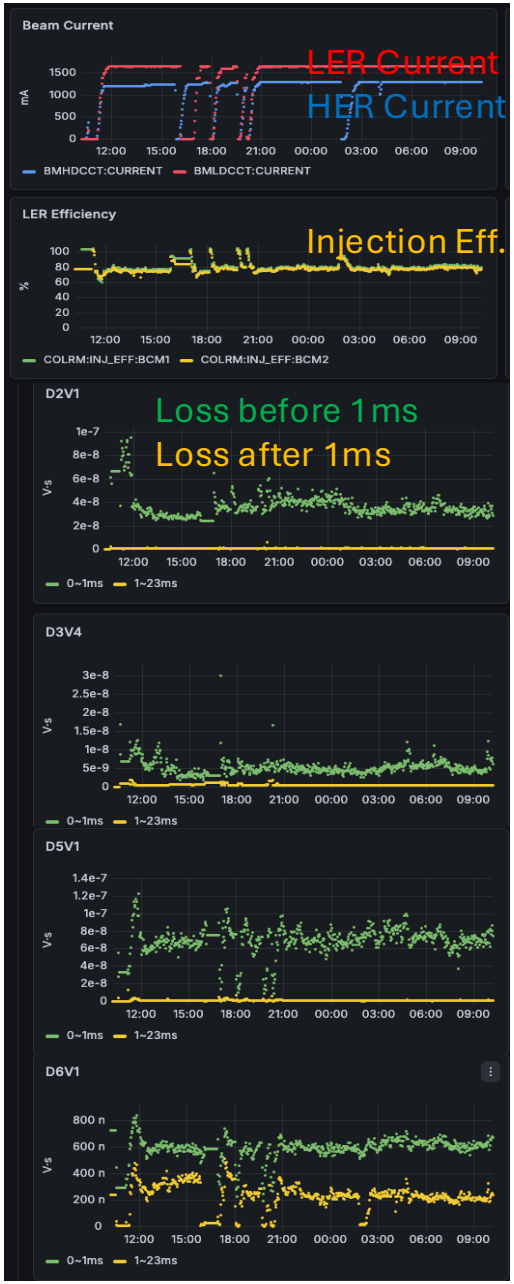




入射ビームロスモニター



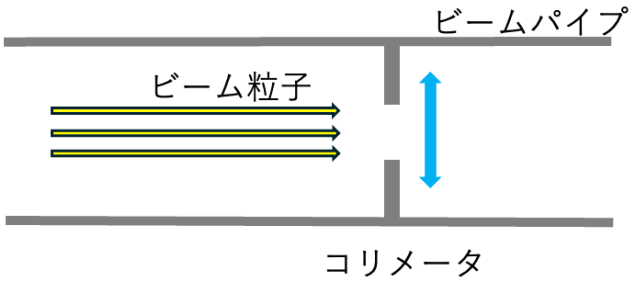




- 主要なロス発生源の特定
- ロス量を見ながらのコリメータ調整
- 入射ビームロスの時間構造の解析　が可能となった

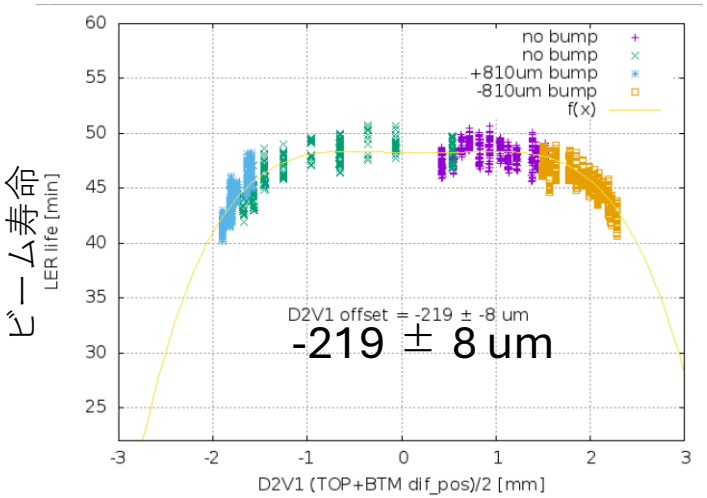
コリメータオフセット測定

- コリメータの座標系とビーム位置の座標系のズレを補正するスタディ

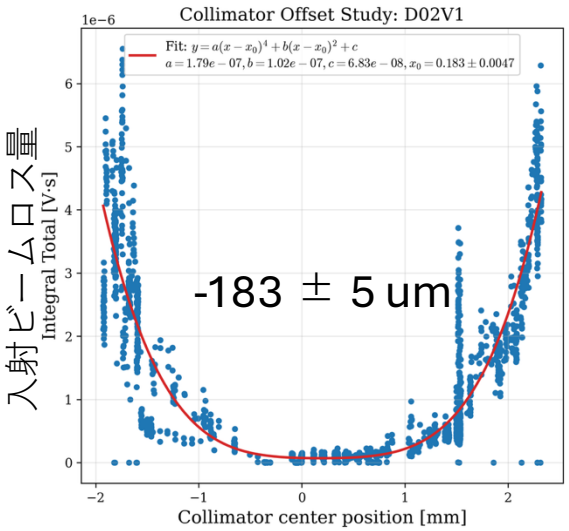


①コリメータの開口幅を固定したまま上下に動かす
②上下に一定以上動かした時のビームとコリメータの衝突の増大を観測
③上下対称な分布の中間点が真のコリメータ開口幅の中心(オフセット)

D02V1コリメータ



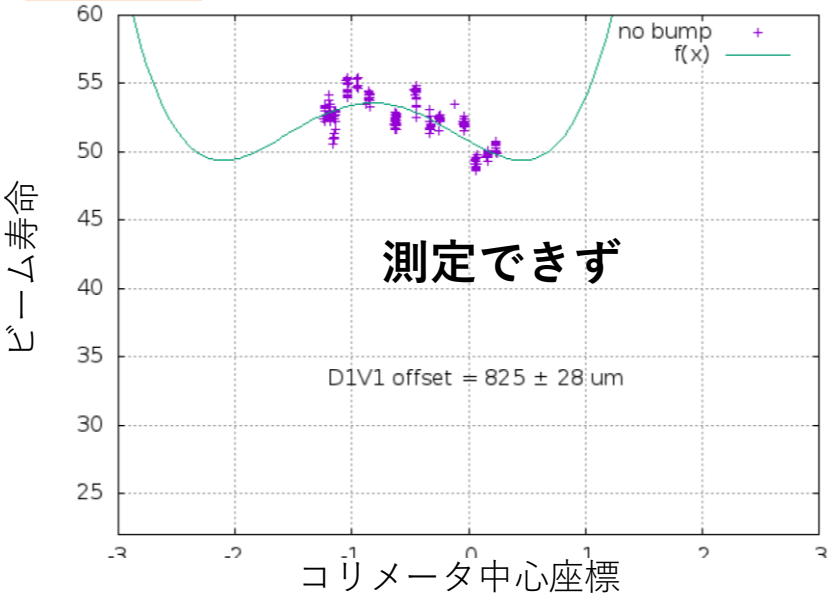
コリメータ中心座標

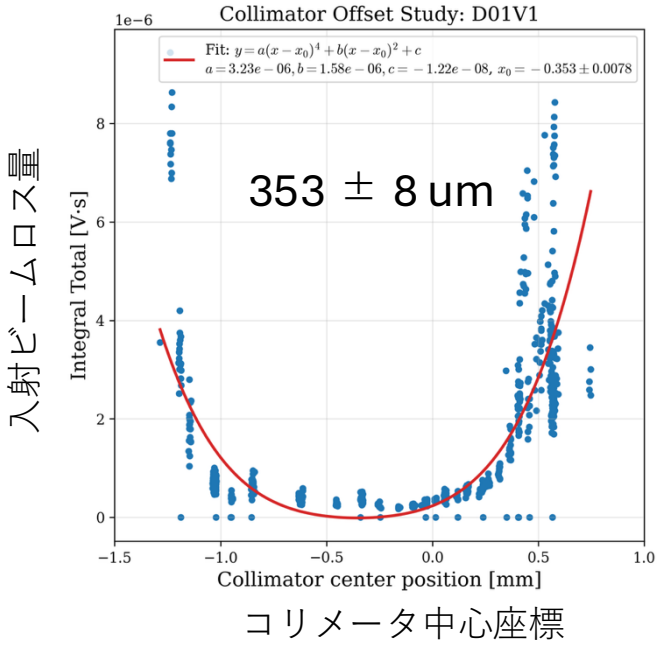


コリメータ中心座標

コリメータオフセット測定

D01V1

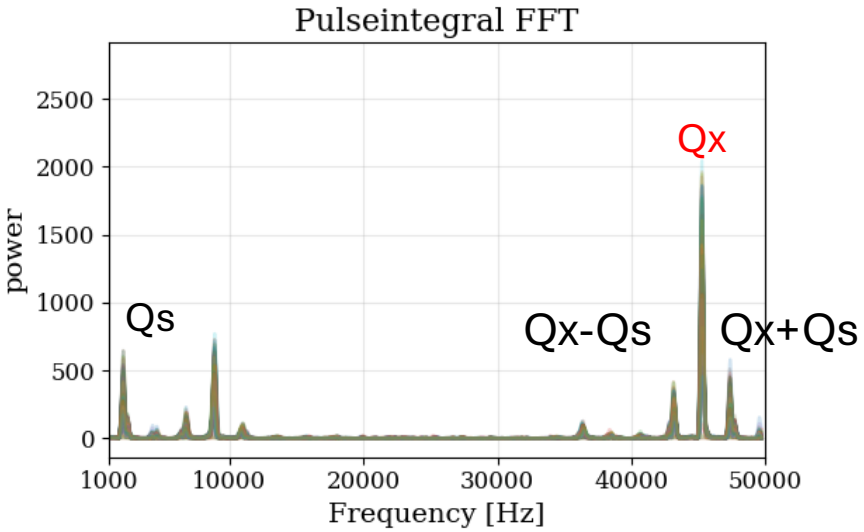


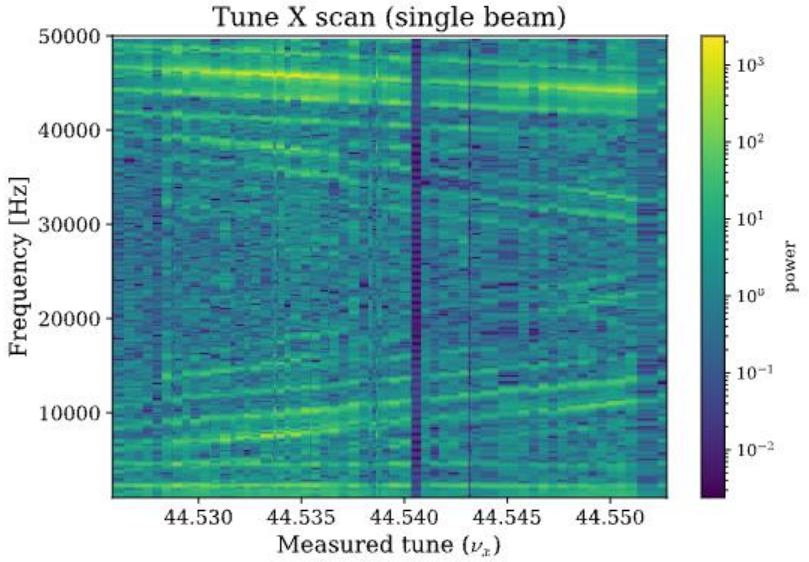


- ビーム寿命を用いた従来手法では、十分な測定ができなかった
- 入射ビームロスを用いた測定では上下対称な分布が得られたことから、この値が実際の運転に採用された
- D01V1は電子リングの衝突点上流側で最も近いコリメータであり、ビームロスからBelle Ⅱ 測定器を守るうえで最重要である。そのコリメータにおけるオフセットが正しく理解できたことは、Belle Ⅱ 実験の安全上非常に重要。

FFT解析

Q : 1周あたりの振動数
Qx(LER) = 44.538　(1-0.538)/10.0614 = 45920Hz
Qy(LER) = 46.588　(1-0.588)/10.0614 = 40950Hz
Qs(LER) = -0.0233　0.0233/10.0614 = 2320Hz





- 1ms以降の入射ビームロスに対してFFTをかけ、スペクトルを取得
- Qs, Qxに対応する振動数にピークが確認された
- 水平チューンスキャンにより、観測されたQxに対応するピークが水平チューン由来であることが確認された。また、その傾きの大きさも予想される大きさと一致した。

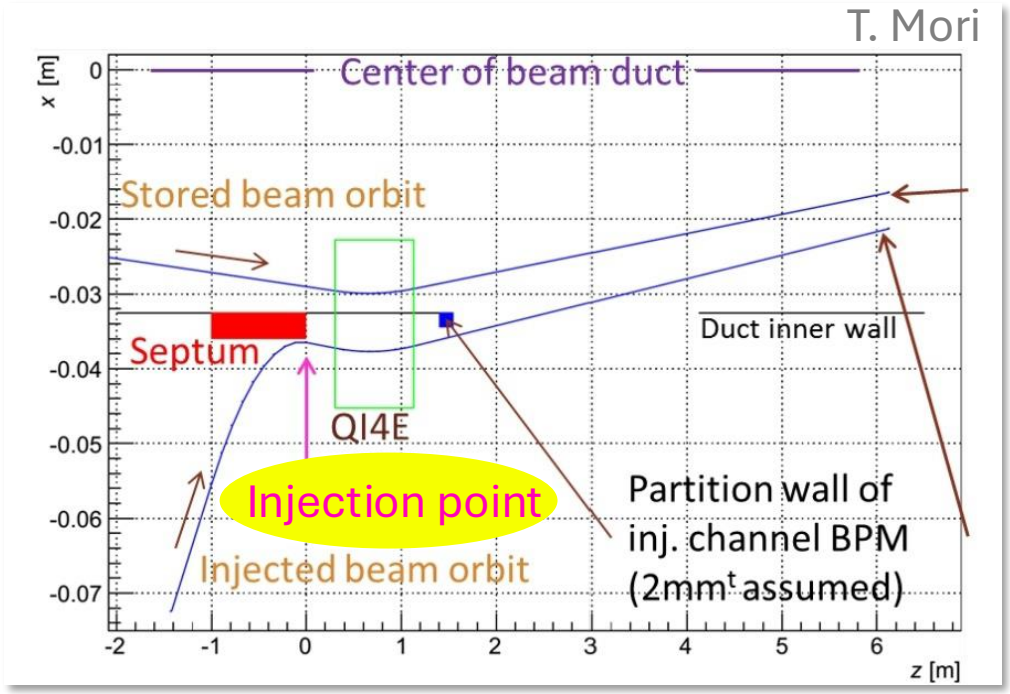
垂直コリメータのロスがQxで変調されている

シミュレーションのモチベーション

- シミュレーションにおいても同様のスペクトルピークは再現できるのか
- これらのピークの起源はなんなのか、それらと相関のある入射パラメータは何か
- これらに基づき、実機において入射ビームロスを減らすために調整されるパラメータは何か

入射シミュレーション

- SuperKEKBシミュレーションにおいてはSADが広く用いられてきたが、近年はXsuiteの活用が進んでいる。Xsuiteでのコリメータスタディは測定と良い一致が見られている
- 入射シミュレーションにおいて、実機のさまざまな入射パラメータを入射点におけるオフセット値として入れることで入射を再現する



strategy

様々な磁石の位置・強さのパラメータ

x = 11.953 mm
px = 1.6769 mrad
y, py = 0
z, delta = 0

放射・ビームビーム効果

放射

平均放射 :放射によるエネルギー損失の平均値だけを入れる

量子放射:光子放出の確率的な揺らぎも含める

↖ 量子放射(quantum radiation)を採用

ビームビーム効果

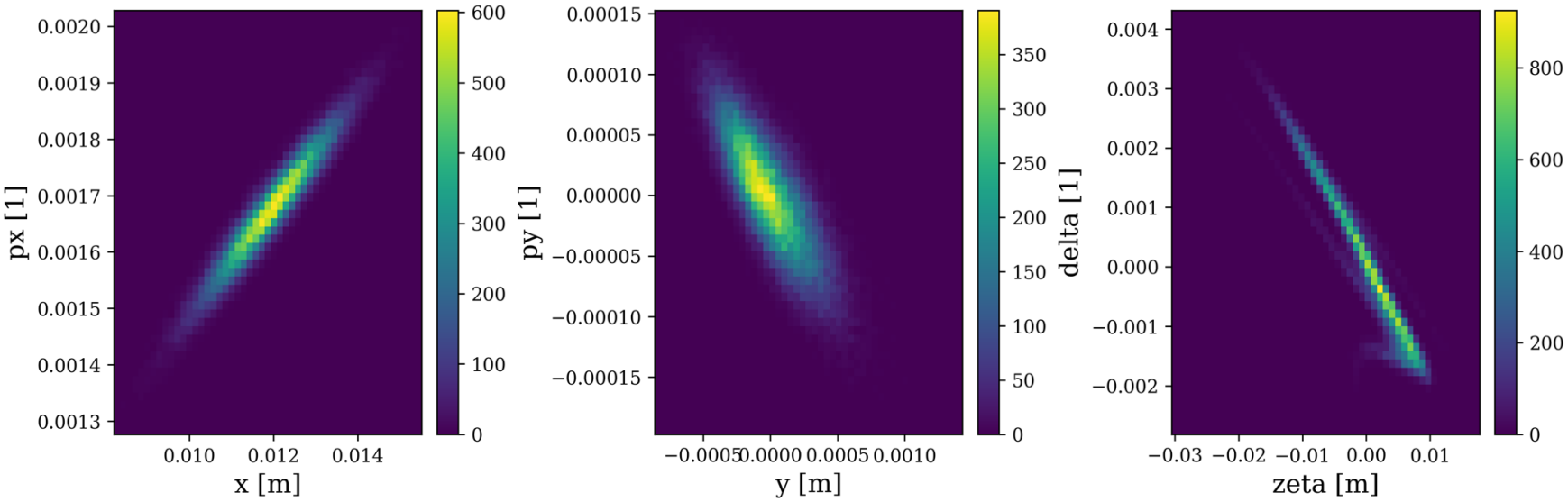
weak-strong 2D :相手のビームを固定した2次元ガウス分布とし、Bassetti–Erskineの式でキックを与える。力の進行方向の変化は無視する

weak-strong 3D :相手のビームを進行方向にスライスし、砂時計効果や交差角による力の変化を取り入れる

strong-strong :両方のビームをスライスし、互いの分布を毎ターン更新する

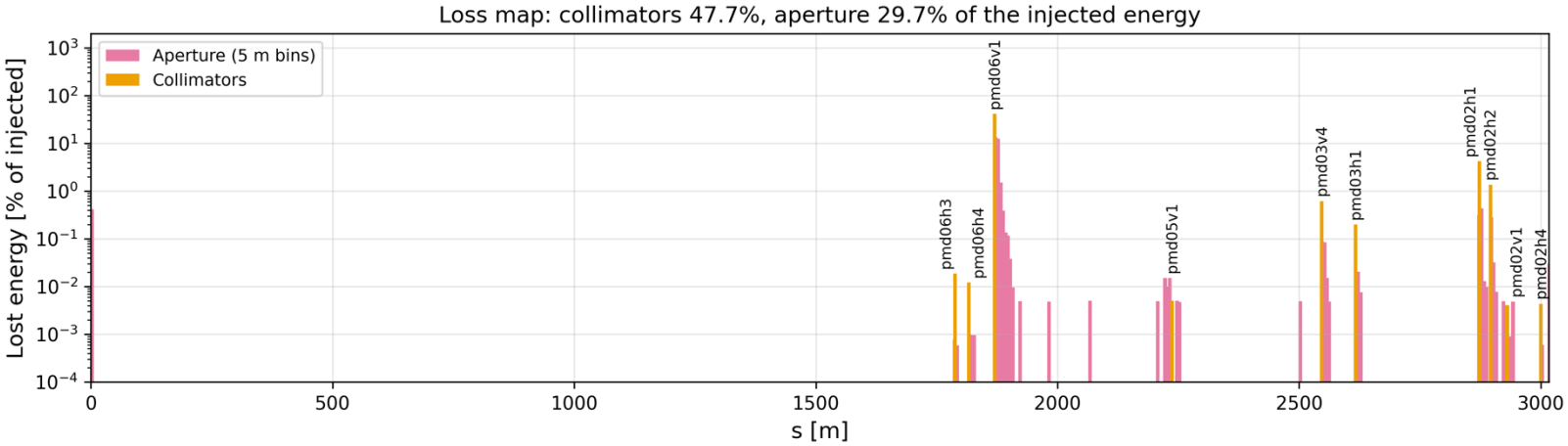
↖ weak-strong 3Dを採用

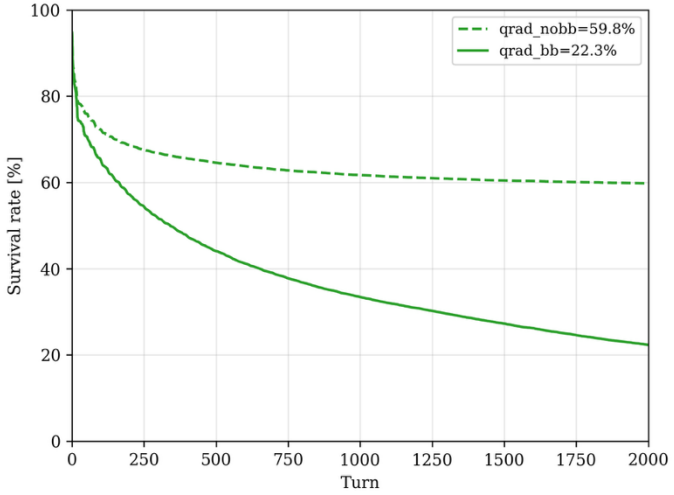
粒子分布



- ビーム輸送ラインの端点（BTエンド）で測定された粒子分布を仮定
- 入射点における粒子分布をエミッタンスを用いて規格化

シミュレーションでの入射ビームロス



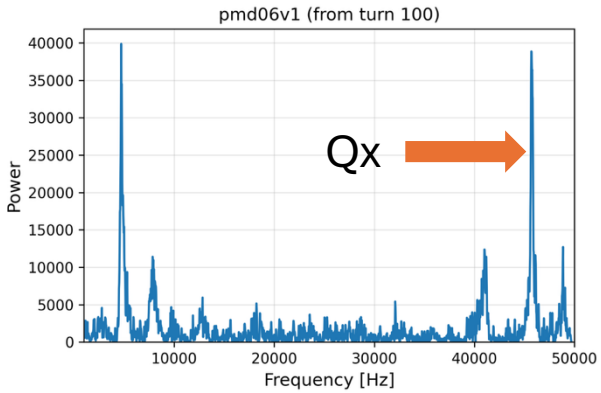


- ロスの主な発生源はD6V1で、これは実機と一致している
- 2000ターン後の生存率は量子放射、beam-beamありで22.3%で、実機では40~50%程度だったため、不一致が見られる
  （ビームビーム効果が大きすぎる可能性）

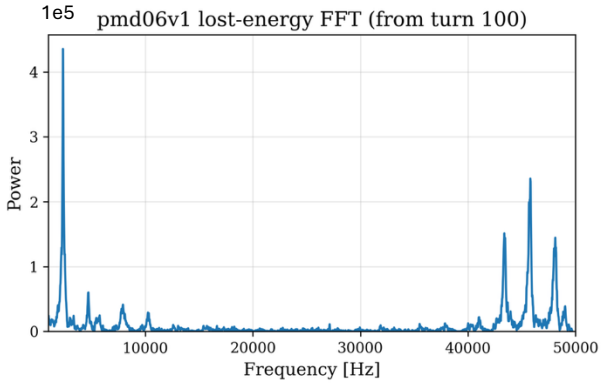
FFT解析

- 実データと同様に、コリメータで発生したターンバイターンの入射ビームロスに対してFFTをかけてスペクトルを得た

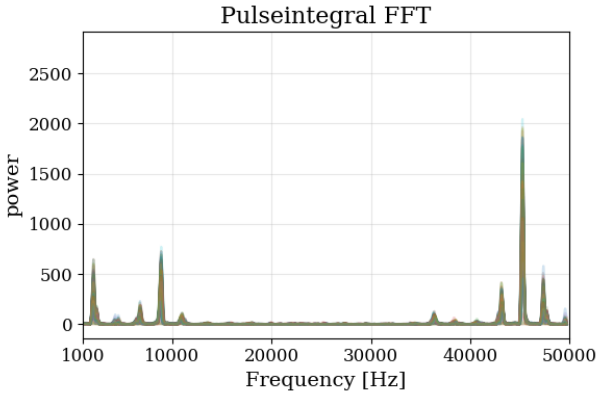
通常入射



zeta = 13.9 mm
(入射位相 -8.5度)

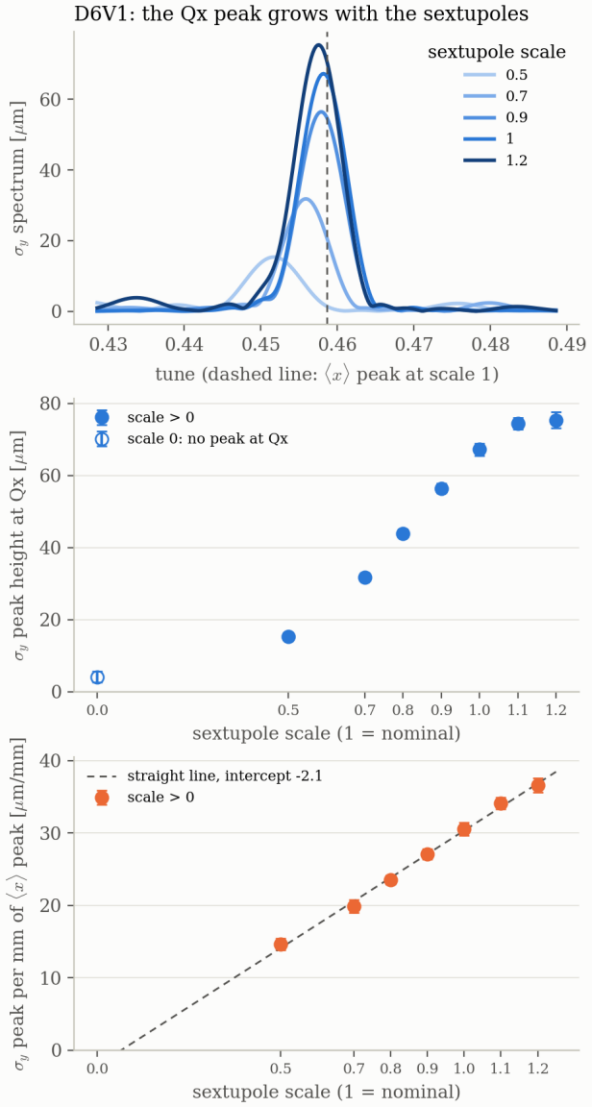


実データ



- シミュレーションにおいてもQxに対応するピークが確認された
  →マグネットのミスアラインメント無しでもy方向にQxで変調されている
- 入射位相のオフセットを入れると、実データのスペクトルをよく再現することが分かった
  →スペクトルを見ることで入射をどう調整すればいいかわかる可能性

6極磁石とQxピークの関係

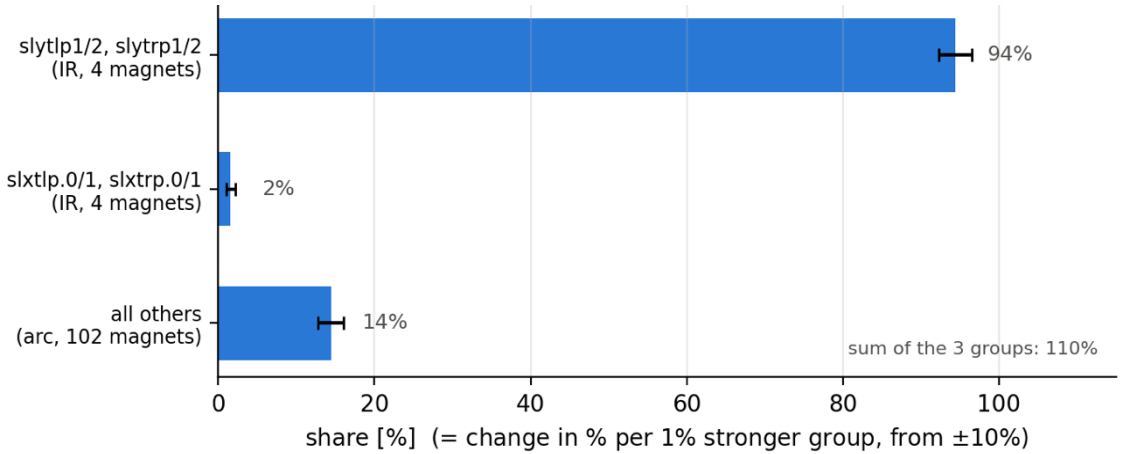


6極磁石：チューンの運動量依存性（色収差）を補正。六極磁石の中心からずれた位置をビームが通過すると、六極磁場の一部が四極磁場や双極磁場のように作用する（フィードダウン）。

5000 粒子, 300ターン
初期条件の縦方向の広がりなし
全110個の6極磁石を同期して強度を変える。
コリメータ、放射、ビームビームは無し
10–300ターンのy方向の太さ(σy)についてFFT

- σyはQxにピークをもち、6極の強さとともに大きくなる
- ピークを ⟨x⟩ の振幅 1 mm あたりに直すと6極の強さに比例する
  → x 振動が6極のフィードダウンで y の太さの揺れになることの根拠

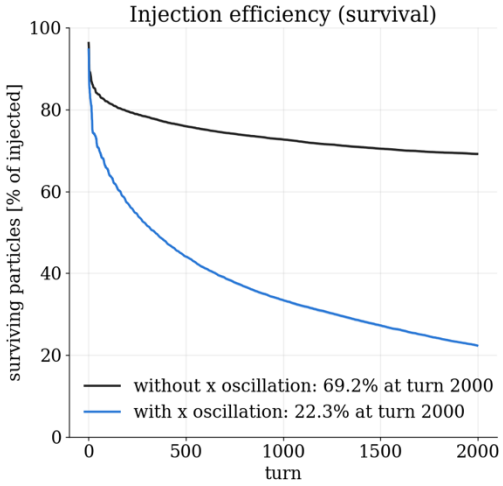
Qx変調に効く6極磁石

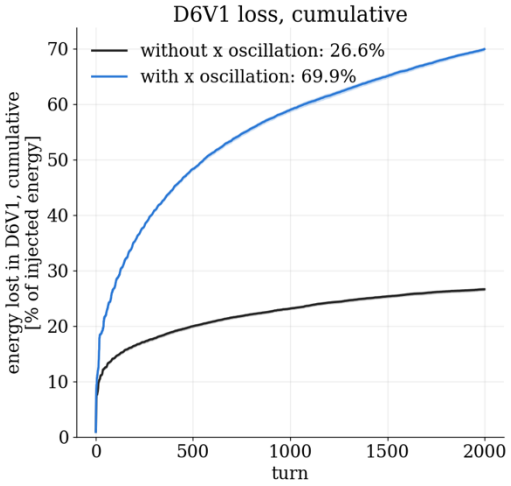


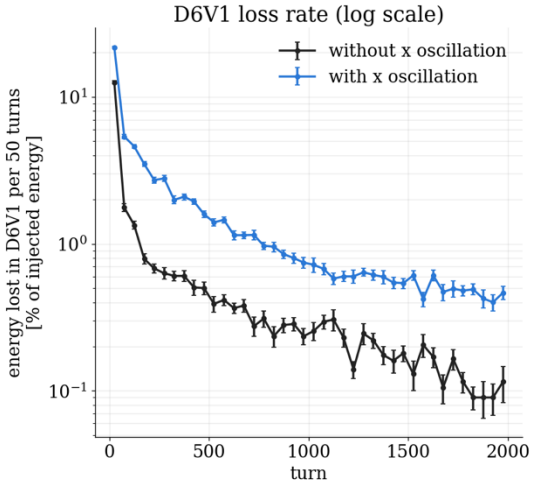
20000粒子、300 ターン
初期条件の縦方向の広がりなし
コリメータ、放射、ビームビーム無し

- 110 台の6極を IR前後の 2 組（x系, y系）とarc部の3つに分類し、それぞれのグループの6極磁石の強さを10%ずつ変化させた時のD6V1 の位置での σy の Qx 成分の変化を見る
- IR両側に位置する 2 組の6極の寄与が94%を占めていることがわかった
（IR の6極はβy が非常に大きいこと、組の 2 台の強さが違うことが原因と考えられる）

入射のx振動由来のロス







BBあり
quantum放射
20000粒子
入射のxオフセットなし

- x振動あり/なしでロスの構造がどうなるか検証
- x振動があるとD6V1での入射ビームのエネルギーに対するロスは2000ターンで27％から70％へ増加（生存率70％→22％）
- x振動由来のロスは長く継続することも確認された

Summary & Outlook

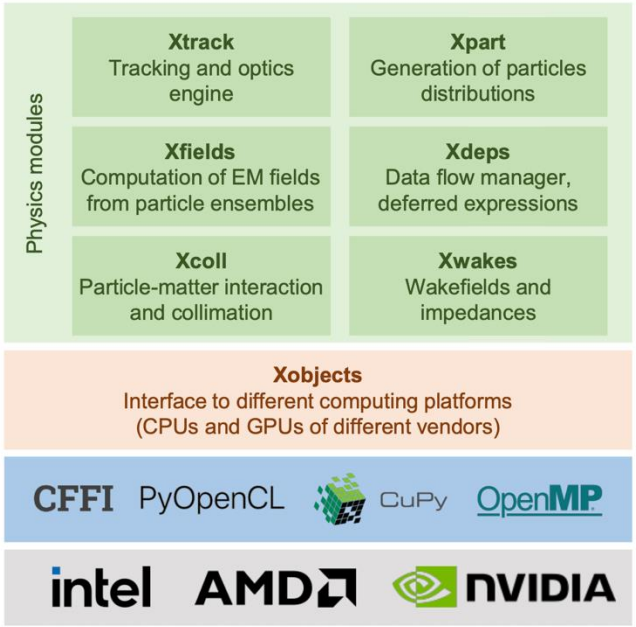
- 入射ビームロス測定システムにより、各コリメータで発生する入射ビームロスの定量的評価及び時間構造の解析が可能となった
- 入射ビームはy方向のビームサイズがQxで変調されていることが測定・シミュレーションの両面から確認された。
- この現象は入射のxオフセット由来のQx振動がIR前後の6極磁石のフィードダウンを受けてy方向に伝わることで発生している。
- この機構で発生するロスは入射ビームロス全体の大きな割合を占める。

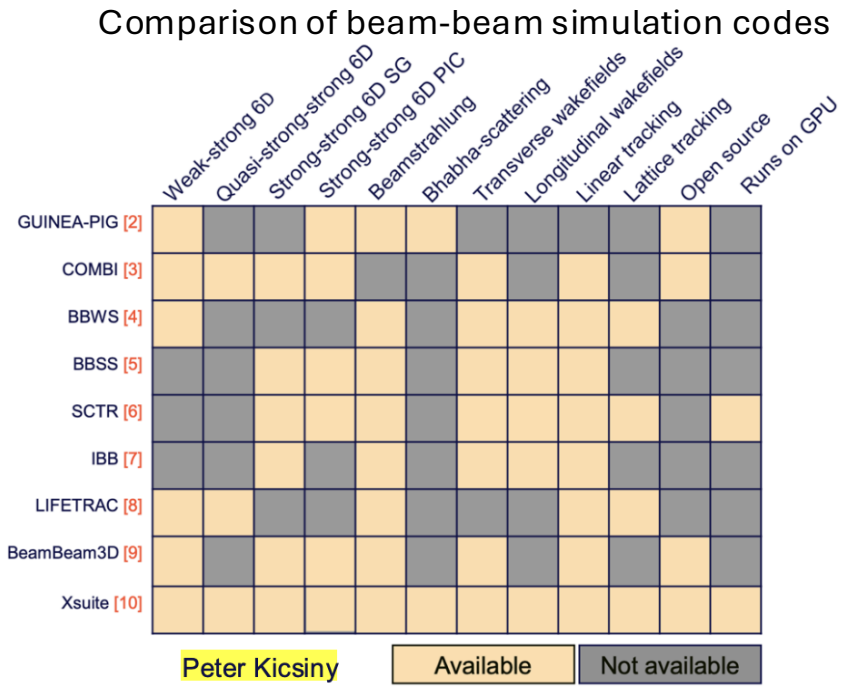
- 今後：この機構に対する実機での対応策を検討する

Back up

Xsuite

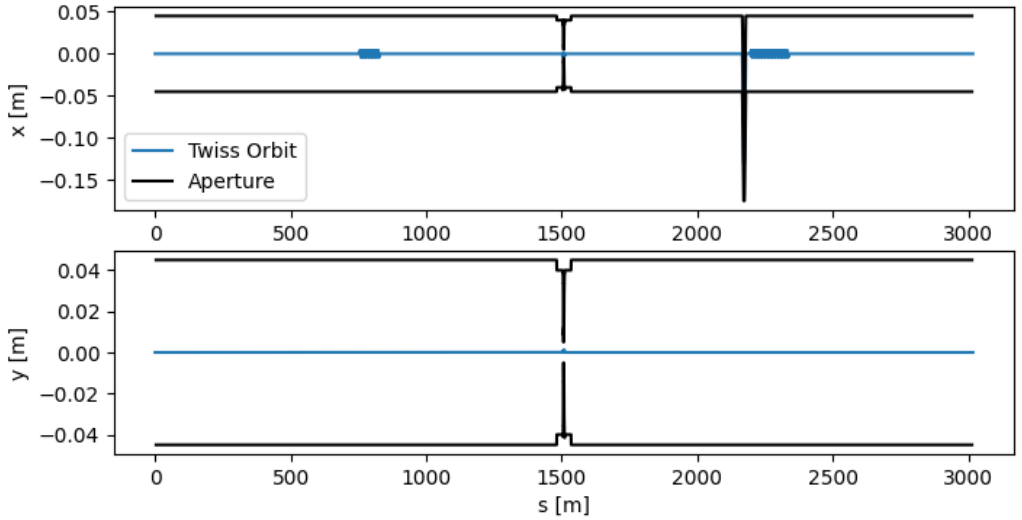
- 2021年からCERNで開発されている、Pythonベースの加速器シミュレーションツール
- Goals : 1st class Python, 1st class collective, 1st class GPU
- 様々なコンピューティングプラットフォームに対応（単一・マルチスレッドCPU、GPUアクセラレーション）



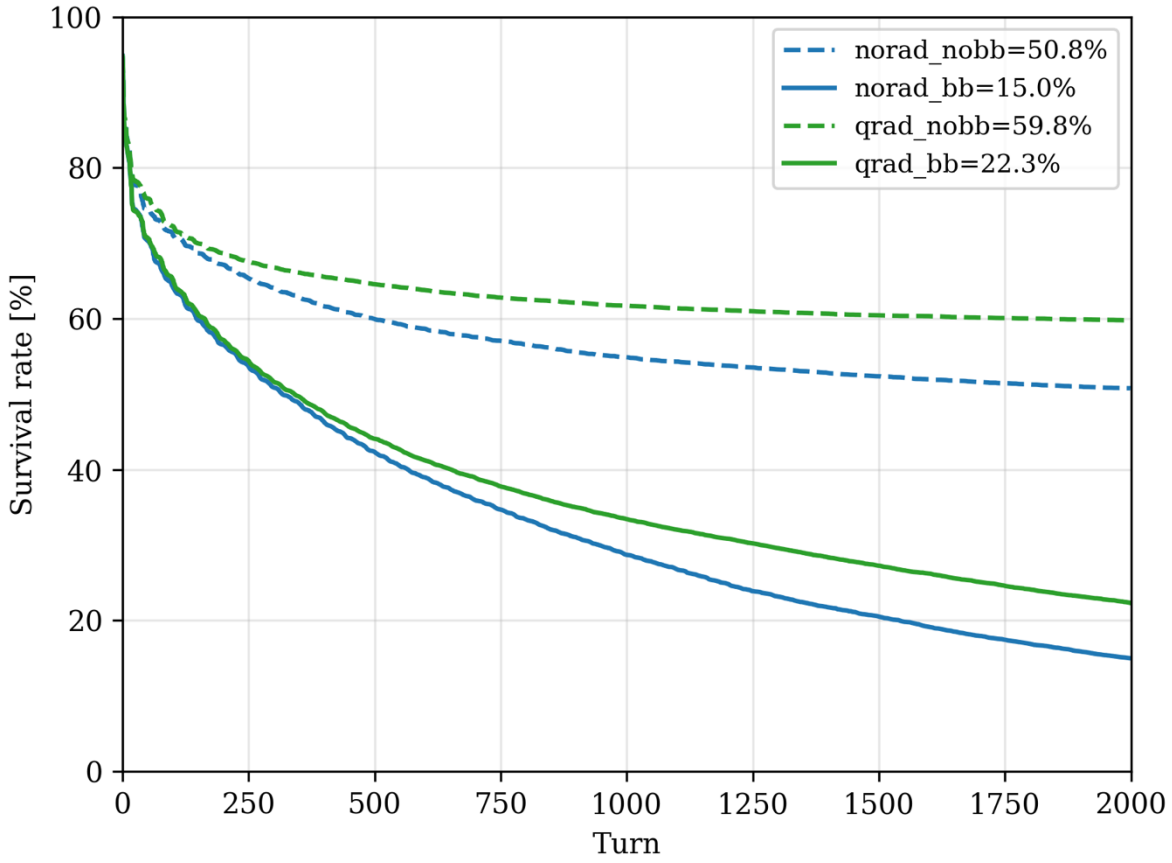


Simulation setup

- Low Energy Ring (LER)
- 2026b baseline lattice (bx*=55mm, by*=0.9mm)
- Collimator setting of 2026/06/16 (DIF_POS PVs)
  DIFPOS … distance of beam and collimator aperture
- Interaction with collimators using Geant4, BDSIM, Xcoll
- No stored beam

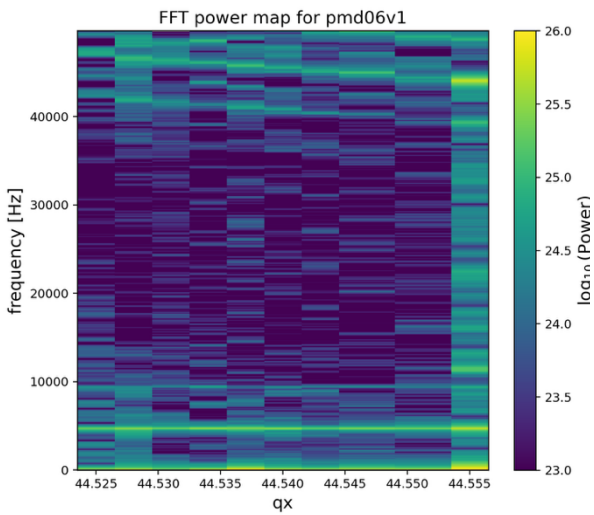


放射有無の違い

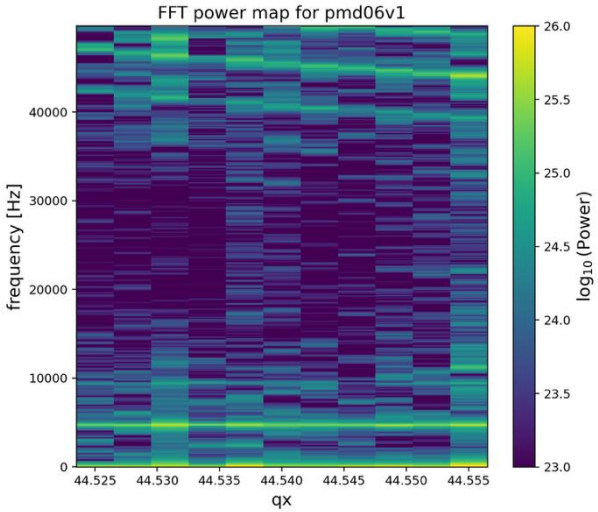

norad_nobb=50.8%
norad_bb=15.0%
qrad_nobb=59.8%
qrad_bb=22.3%
Survival rate [%]
Turn
0
20
40
60
80
100
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000

Tune scan (D6V1)

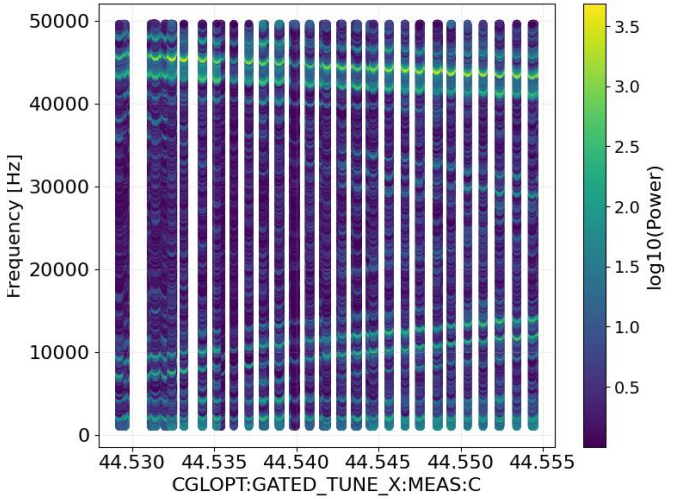
mean rad, nobb



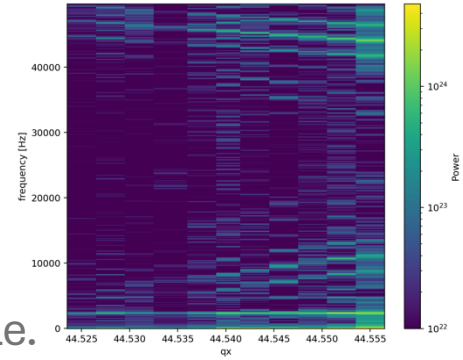
mean rad, bb



Measured

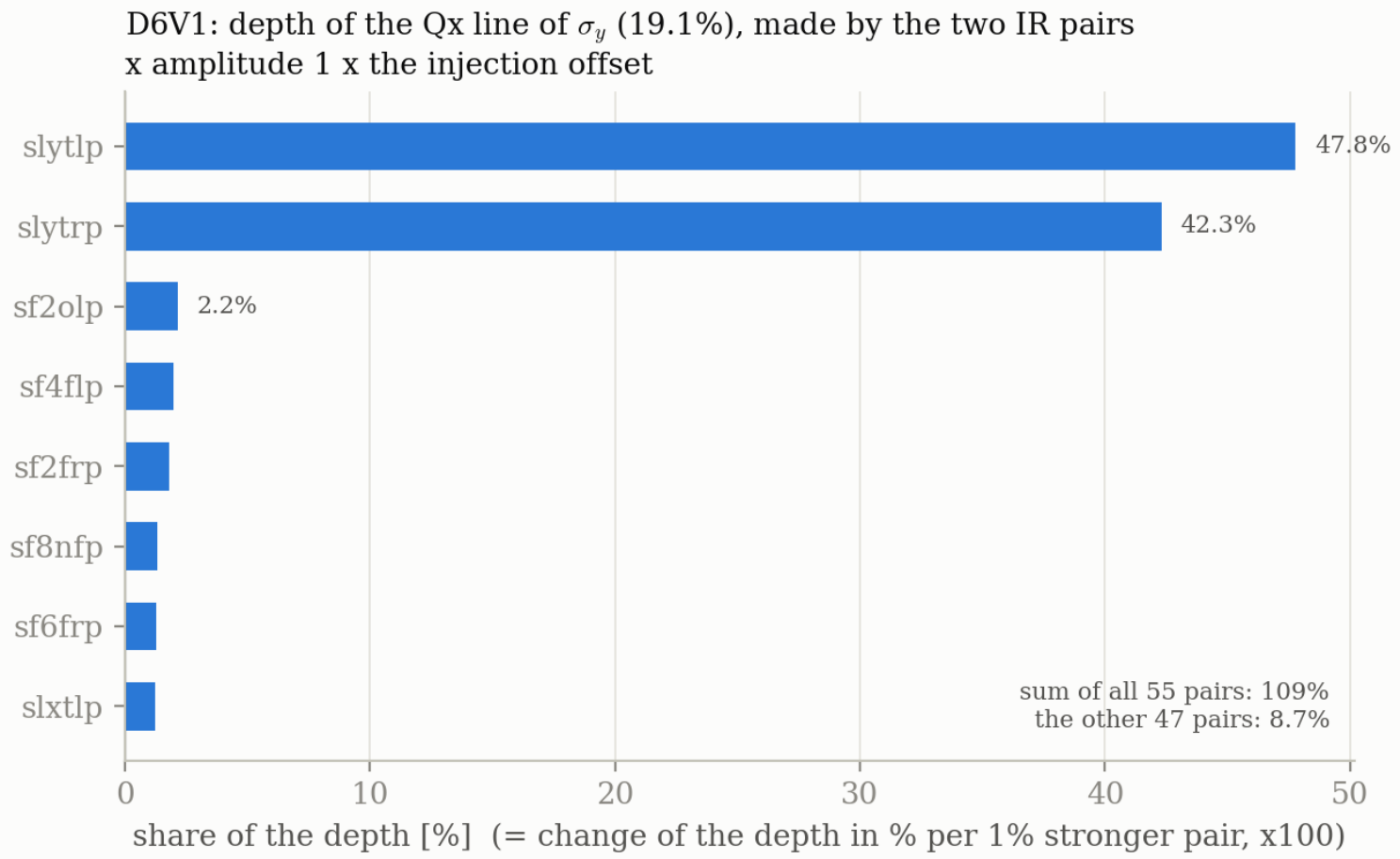


- Simulation reproduce the measurement in general.
- Injection beam oscillates Qx without misalignment.
- This implies some coupling effect exists.

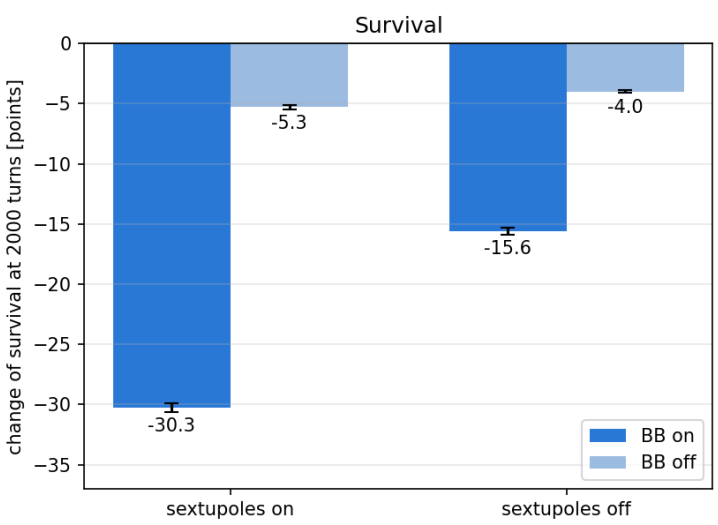


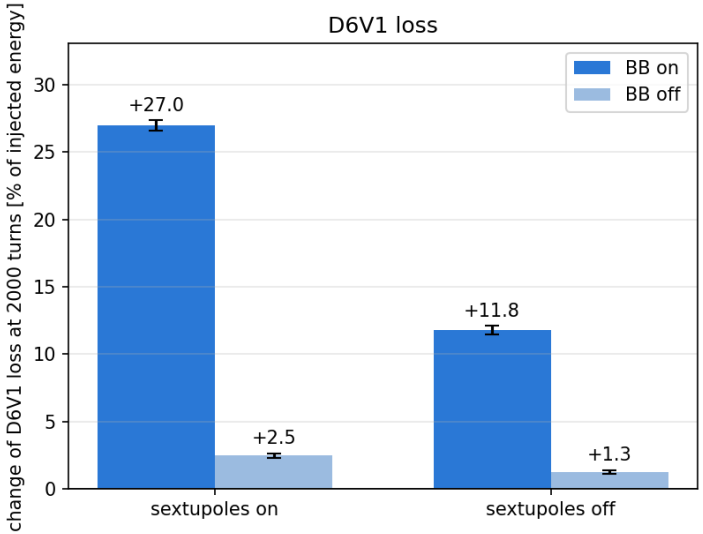
With injection timing error,
resonance lines clearly visible.

6極の組みごとの寄与


D6V1: depth of the Qx line of σ_y (19.1%), made by the two IR pairs
x amplitude 1 x the injection offset
slytlp
slytrp
sf2olp
sf4flp
sf2frp
sf8nfp
sf6frp
slxtlp
47.8%
42.3%
2.2%
sum of all 55 pairs: 109%
the other 47 pairs: 8.7%
0
10
20
30
40
50
share of the depth [%] (= change of the depth in % per 1% stronger pair, x100)

x振動/6極/ BBの影響の評価

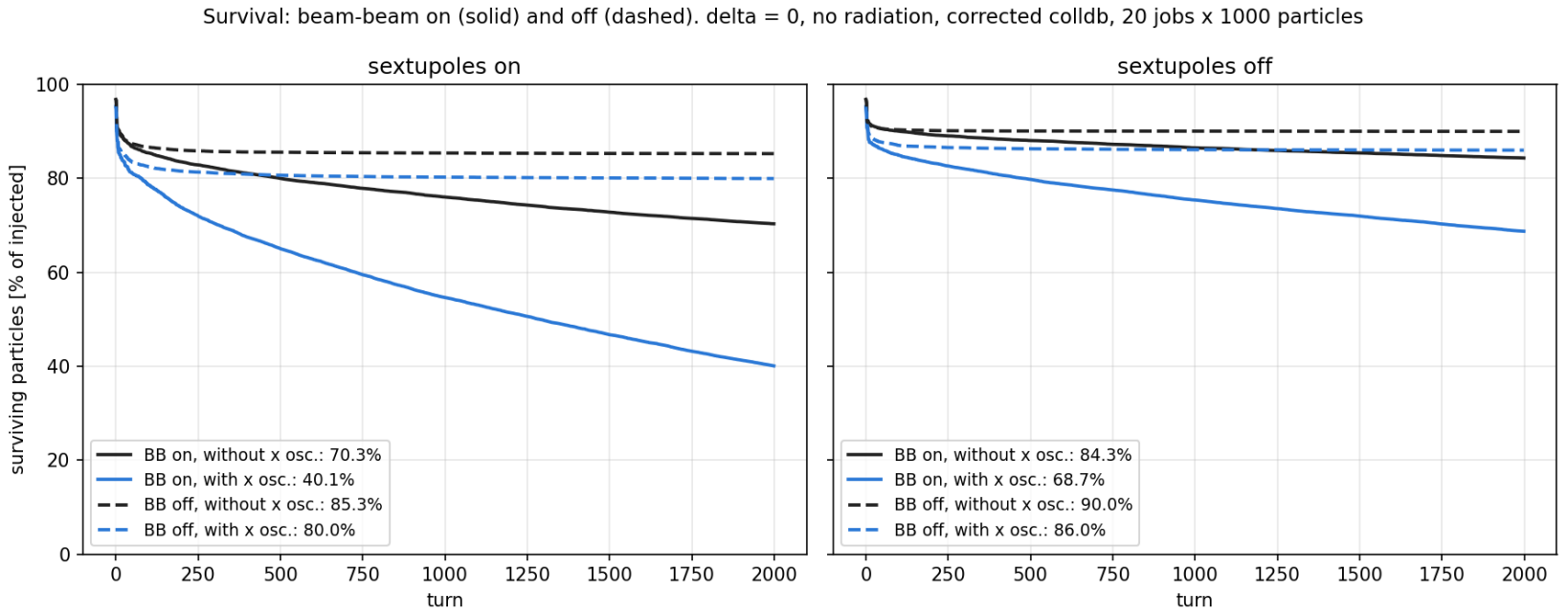




放射なし
tracking中もzeta, deltaを初期値（閉軌道）に固定（縦方向の運動なし）
x振動なし：x, px = 0

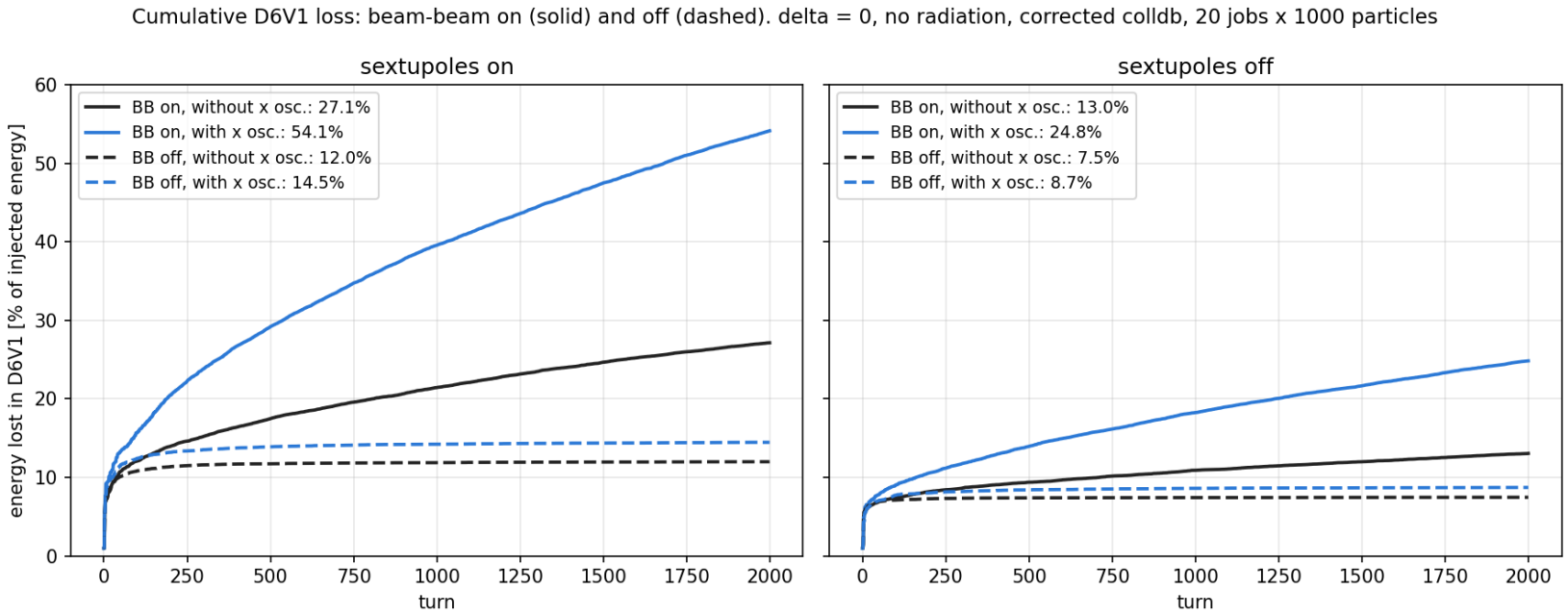
- x振動が6極でy方向のビーム広がりに変換されてD6V1でロスが発生するというシナリオの検証。
- BB がないと、x 振動があっても生存率は 4〜5 ポイントしか下がらない（六極の有無によらない）
- BBありで、6極onでx振動ありでは、6極onでx振動なしと比較して生存率が30％ポイント下がる。そのほとんどがD6V1で失われている
- x振動ありで6極offでも、BBがあるとロスが15ポイント程度増えている→y方向のQx変調以外の機構（チューン変動など）が考えられる

生存率とロスの時間変化

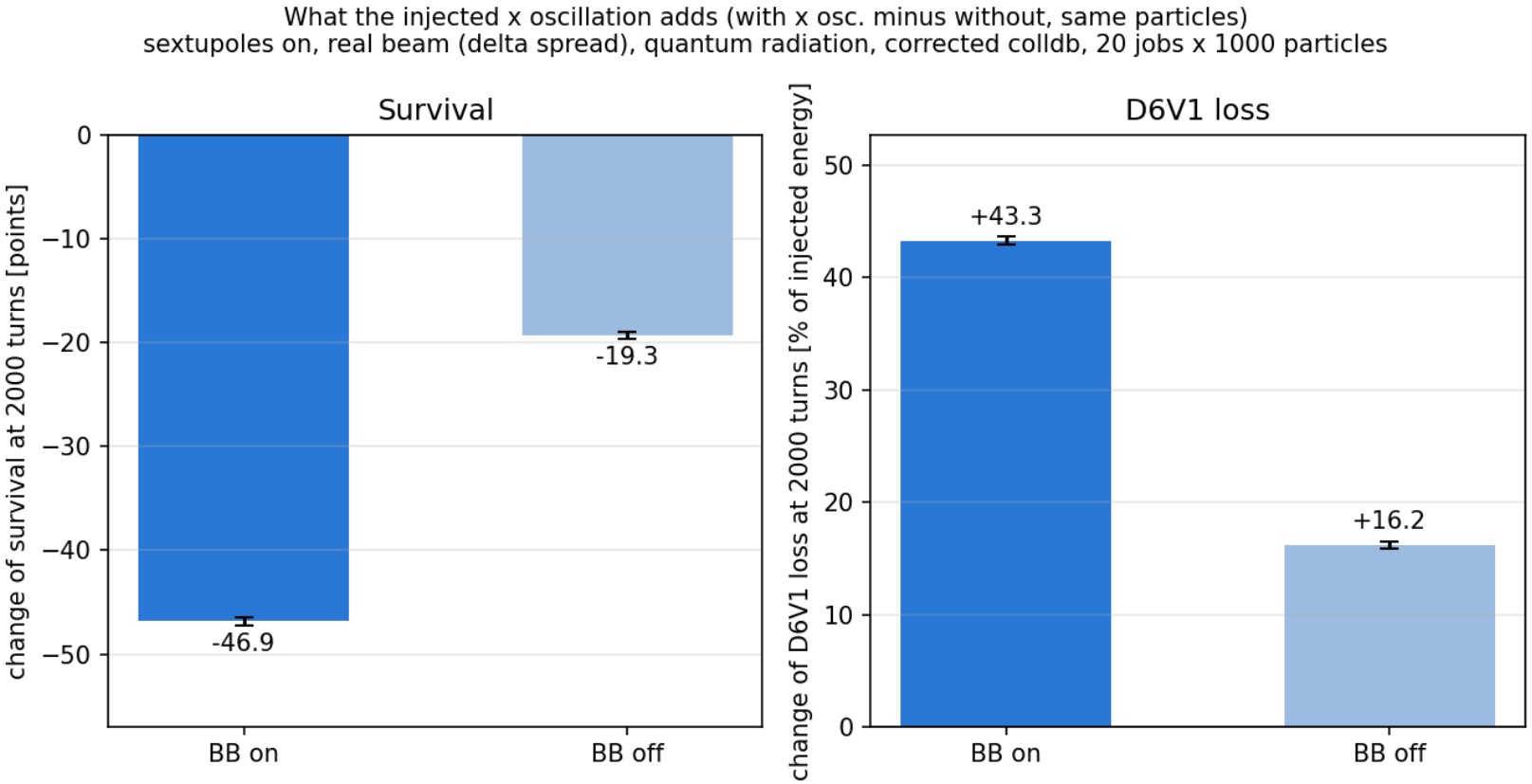


x振動が６極でy方向のビーム広がりに変換されてD6V1でロスが発生するというシナリオの検証（放射なし、s方向の広がり０）

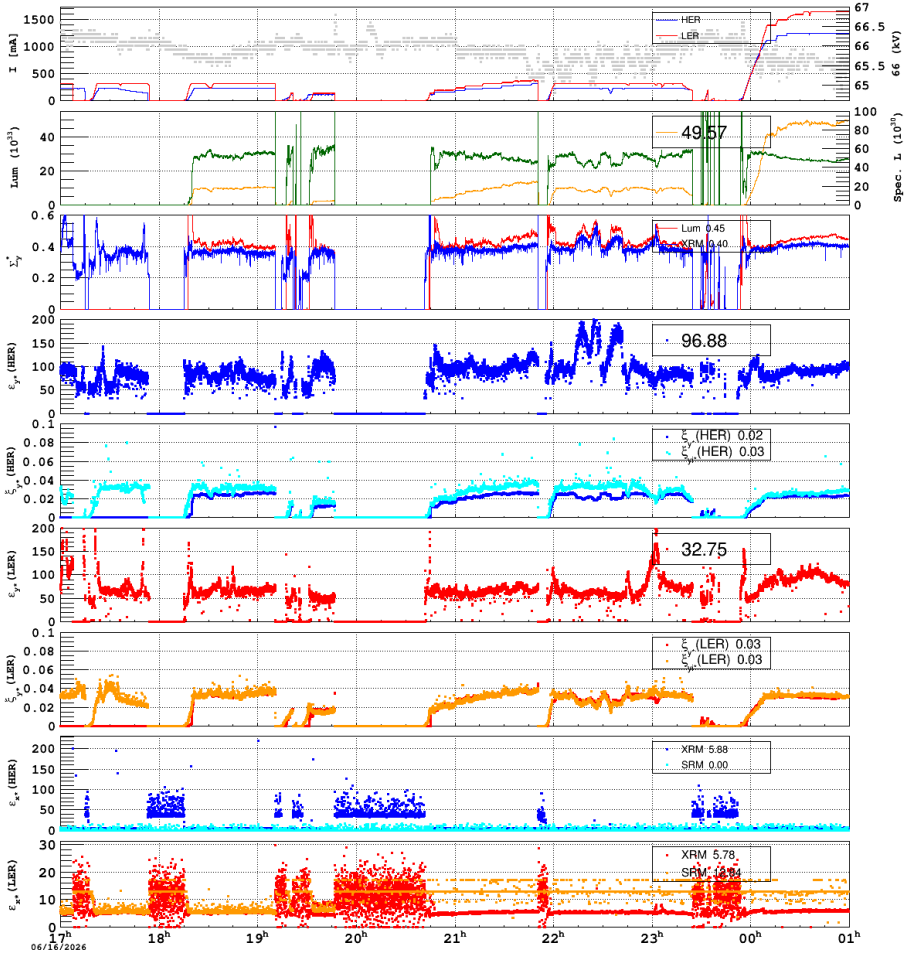
生存率とロスの時間変化



放射あり ver

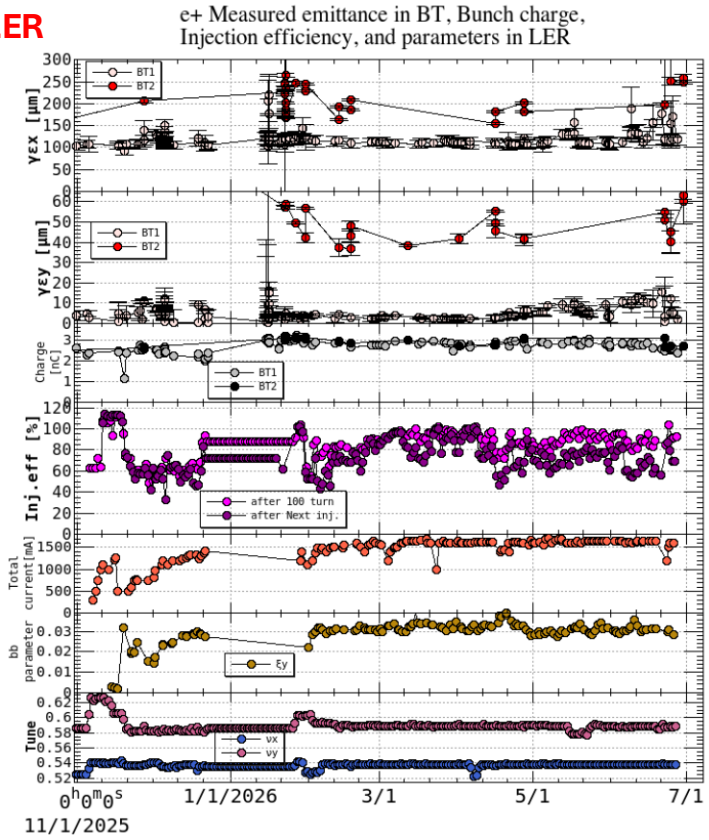

What the injected x oscillation adds (with x osc. minus without, same particles)
sextupoles on, real beam (delta spread), quantum radiation, corrected colldb, 20 jobs x 1000 particles
Survival
change of survival at 2000 turns [points]
0
−10
−20
−30
−40
−50
-46.9
-19.3
BB on
BB off
D6V1 loss
change of D6V1 loss at 2000 turns [% of injected energy]
50
40
30
20
10
0
+43.3
+16.2
BB on
BB off

Injection parameters for tune scan



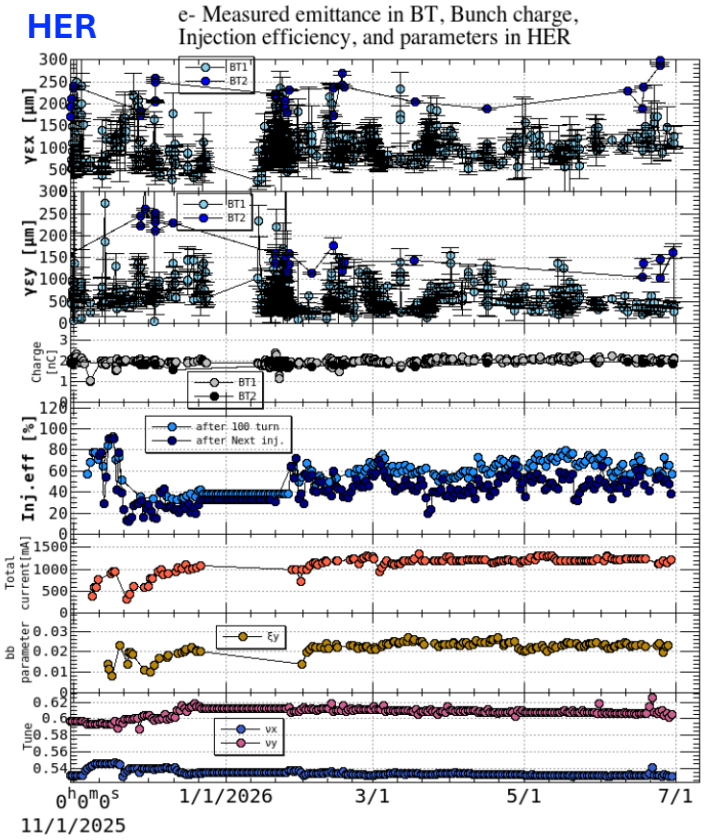
From lida-san

LER



e+ 2026ab	BT1	BT2	Req.
γεx [μm]	119.0 ± 2.0	207.2 ± 9.0	100
γεy [μm]	5.40 ± 0.39	47.26 ± 1.82	15

HER



e- 2026ab	BT1	BT2	Req.
γεx [μm]	104.0 ± 1.7	233.4 ± 11.4	40
γεy [μm]	52.83 ± 1.58	134.6 ± 6.8	20

From Iida-san

βy*=0.9mm

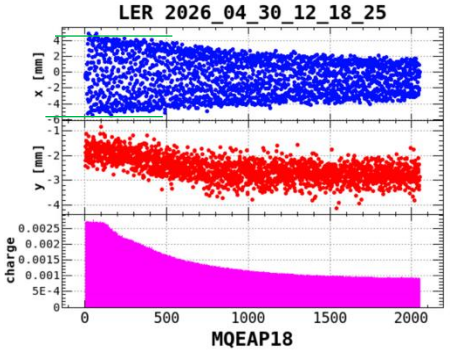
- **LER**
  2026-4-30 11:30に、βy*=1mm→0.9mm

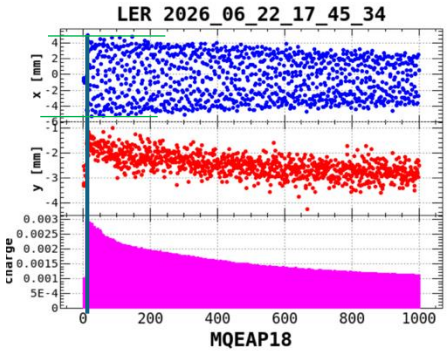
Stored beam H. Aperture測定

+5.0mm -5.4 mm
→±5.2mm
@MQEAP18

Injection beam

+5.1 mm -5.3 mm
→±**5.2mm**
@MQEAP18



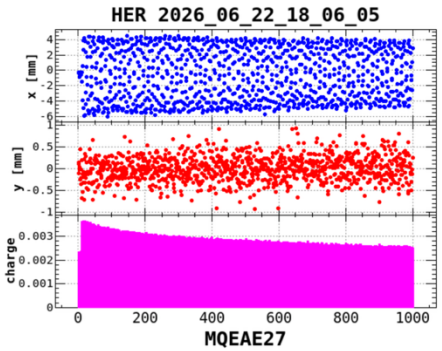


	LER	LER
ΔX [mm] (MQEAP18)	±5.2	±5.2
βx [m] (MQEAP18)	24.4	24.4
βx [m] (PINJAX0)	183	147(-20%)
ΔX [m] (PINJAX0)	±14.25	±12.75

- **HER**
  2026-4-27 19:00に、βy*=1mm→0.9mm

Injection beam

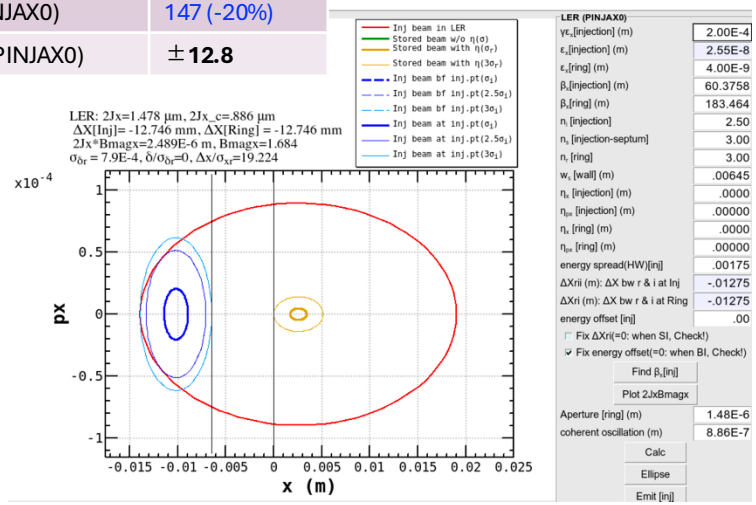
+4.5 mm -6 mm
→±**5.25mm**
@MQEAE27



	HER
ΔX [mm] (MQEAP18)	±5.25
βx [m] (MQEAP18)	48.505
βx [m] (PINJAX0)	108.356
ΔX [m] (PINJAX0)	±7.85

From lida-san

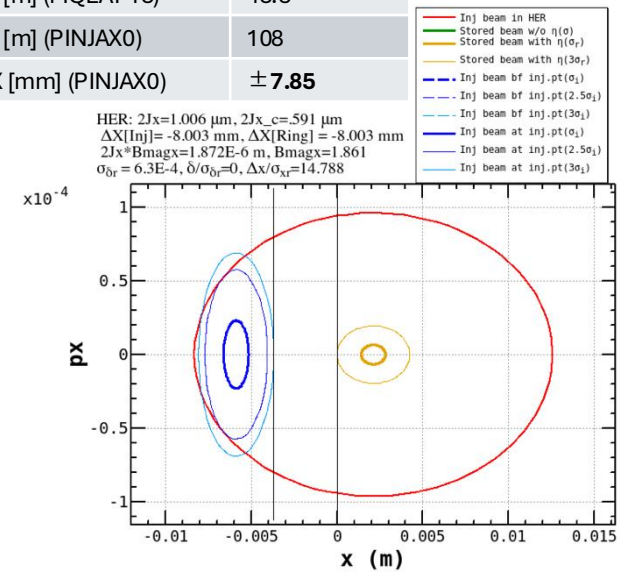
	LER
ΔX [mm] (MQEAP18)	±5.2
βx [m] (MQEAP18)	24.4
βx [m] (PINJAX0)	147 (-20%)
ΔX [mm] (PINJAX0)	±**12.8**



2Jy=9ey=9 γεy/4GeV*Me
=9*47.26um/4e9*0.511e6
=9*6.04=54.3 nm=0.054um
6*6.04=36.2 nm=0.036um

by*	Action	Injected beam	Ring Acc.
0.9	2Jx [μm]	1.48 >	1.15
	2Jy [μm]	0.036 <	0.044
1.0	2Jx [μm]		1.65
	2Jy [μm]		0.04

	HER
ΔX [mm] (MQEAP18)	±5.25
βx [m] (MQEAP18)	48.5
βx [m] (PINJAX0)	108
ΔX [mm] (PINJAX0)	±**7.85**



2Jy=9ey=9 γεy/7GeV*Me
=9*134.6um/7e9*0.511e6
=9*9.826=88.43 nm=0.088um
6*9.826=59.0 nm=0.059um

βy*	Action	Injected beam	Ring Acc.
0.9	2Jx [μm]	1.01 <	1.4
	2Jy [μm]	0.059 >>	0.038
1.0	2Jx [μm]		1.7
	2Jy [μm]		0.037