

NanoTerasuにおける線型加速器の ビーム安定性の評価

QST：菅晃一，安積隆夫，上島考太，
小原脩平，保坂勇志，西森信行
NAT Corporation：青木駿堯

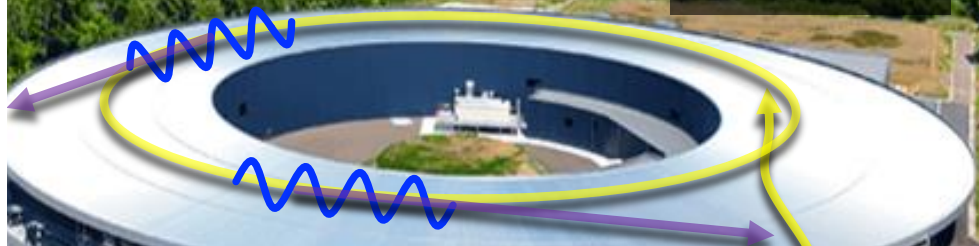
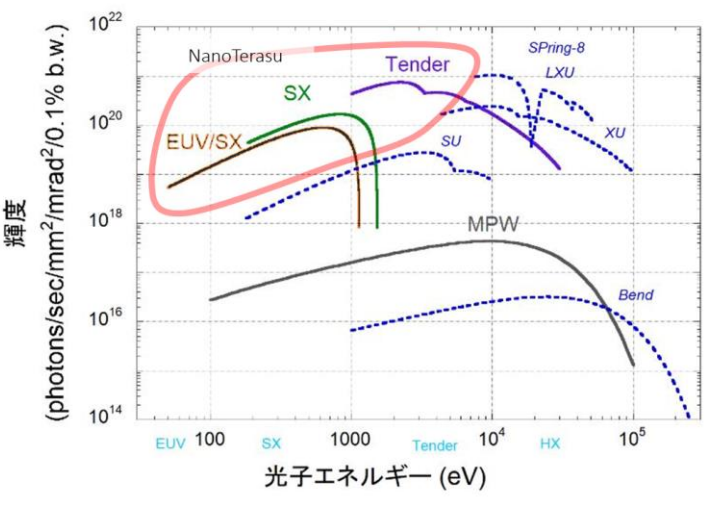
内容

- ◆ 次世代放射光施設ナノテラス
 - ・ 施設の構成
- ◆ 3 GeV線型加速器
 - ・ 線型加速器の構成
 - ・ 低エミッタンス40 MeV入射部
 - ・ 主加速部
 - ・ RF機器の安定性
 - ・ 線型加速器におけるビーム光学系
 - ・ 加速ユニット停止頻度の推移、蓄積の様子
- ◆ まとめ

施設の特徴



蓄積リング
周長：349 m



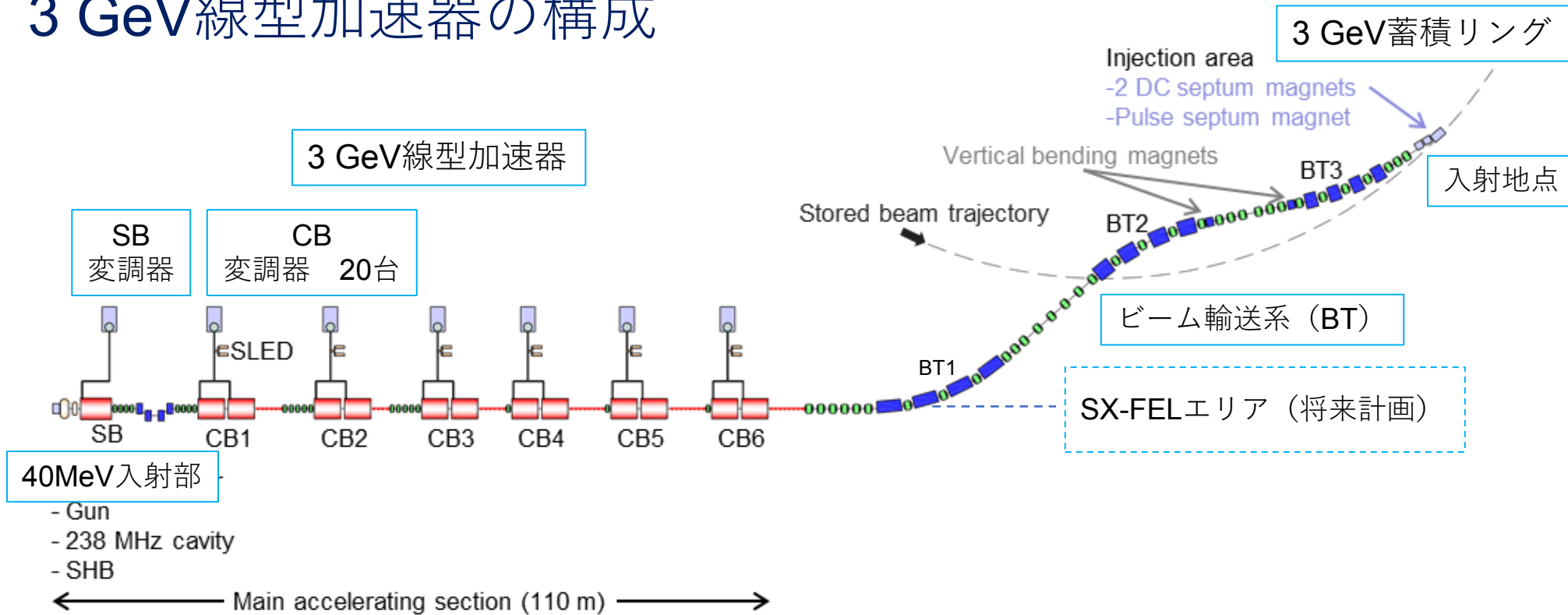
ビームライン
@実験ホール

110 m

線型加速器

ナノテラス パラメータ	
ビームエネルギー	3 GeV
蓄積電流	400 mA
エミッタンス	1.14 n m rad
ビームサイズ (長直線部)	H 122 μm / V 5.8 μm
最大アンジュレータ - BL本数	14
最大MPW - BL本数	14

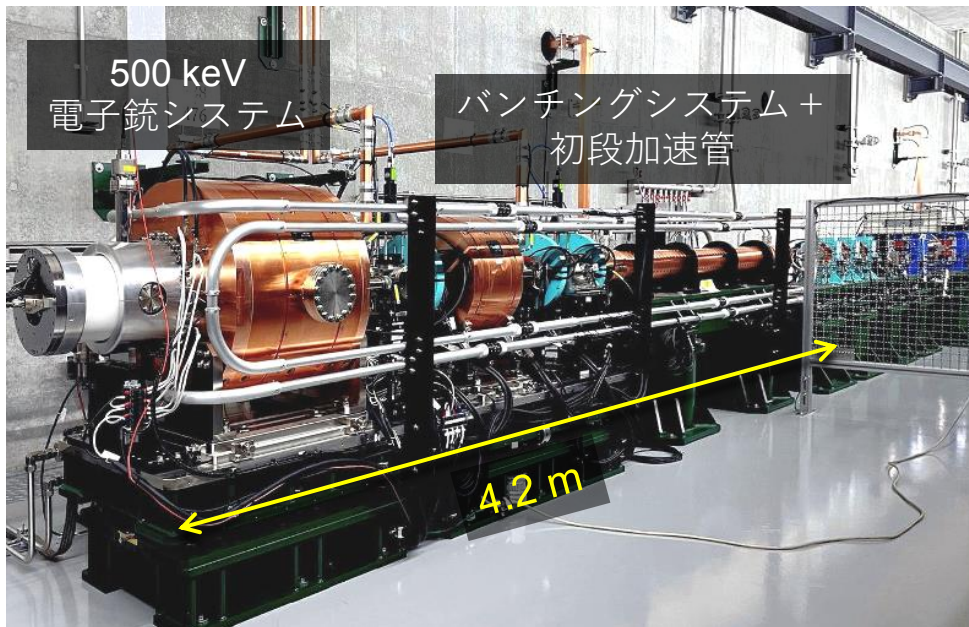
3 GeV線型加速器の構成



- ◆ 新型のグリッド付き熱電子源を用いた電子銃システム
- ◆ コンパクトな40 MeV入射部
- ◆ Cバンド加速管40本、大電力ユニット20台を採用
40 × 2 m × 40 MV/mで3 GeV加速
- ◆ 将来の軟エックス線FELも視野
バンチ圧縮システム導入エリアを予め配慮

3 GeV線型加速器

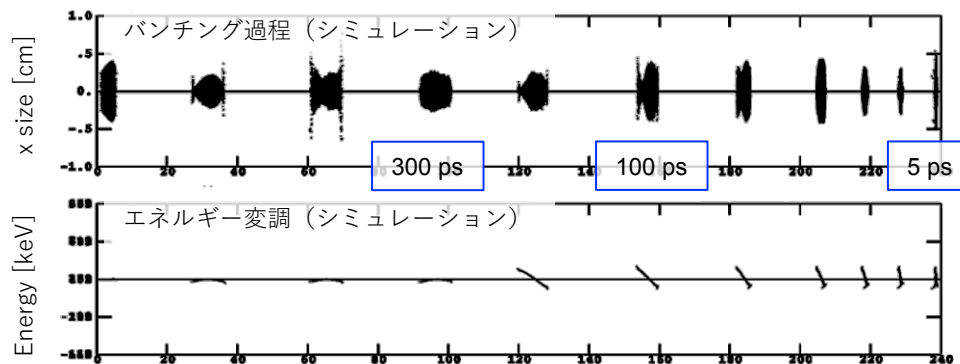
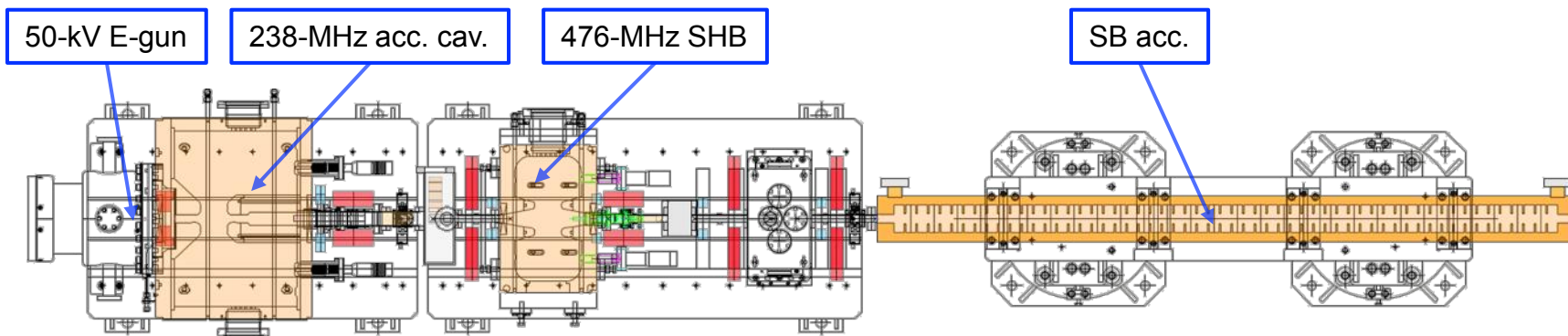
40 MeV入射部



主加速部



低エミッタンス40 MeV入射部



◆ 特徴

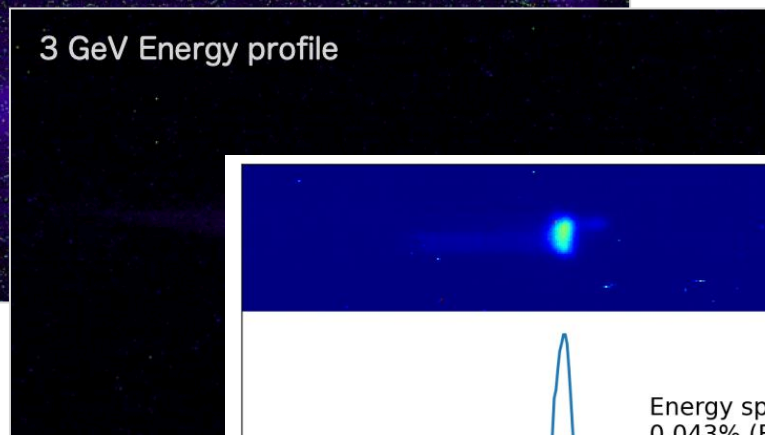
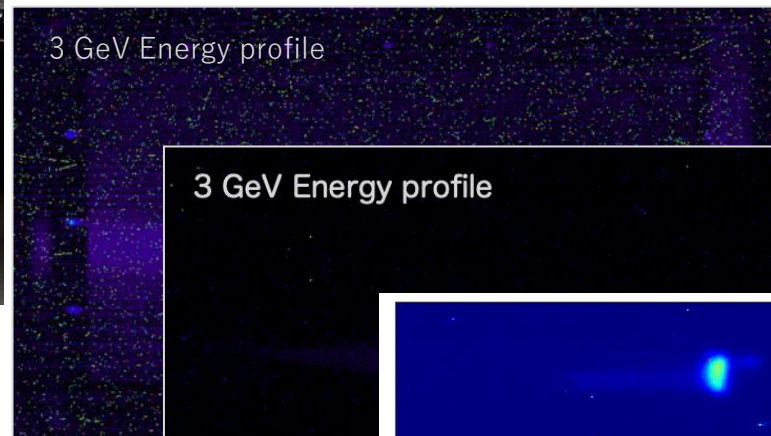
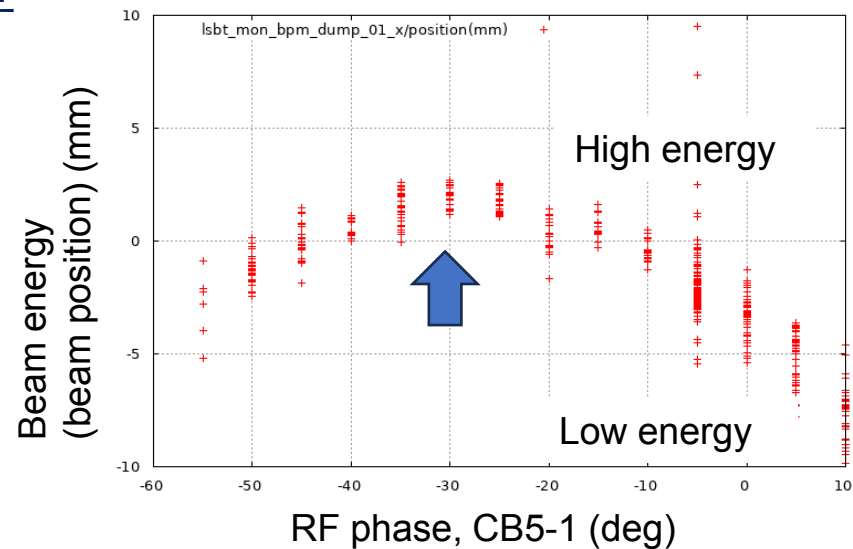
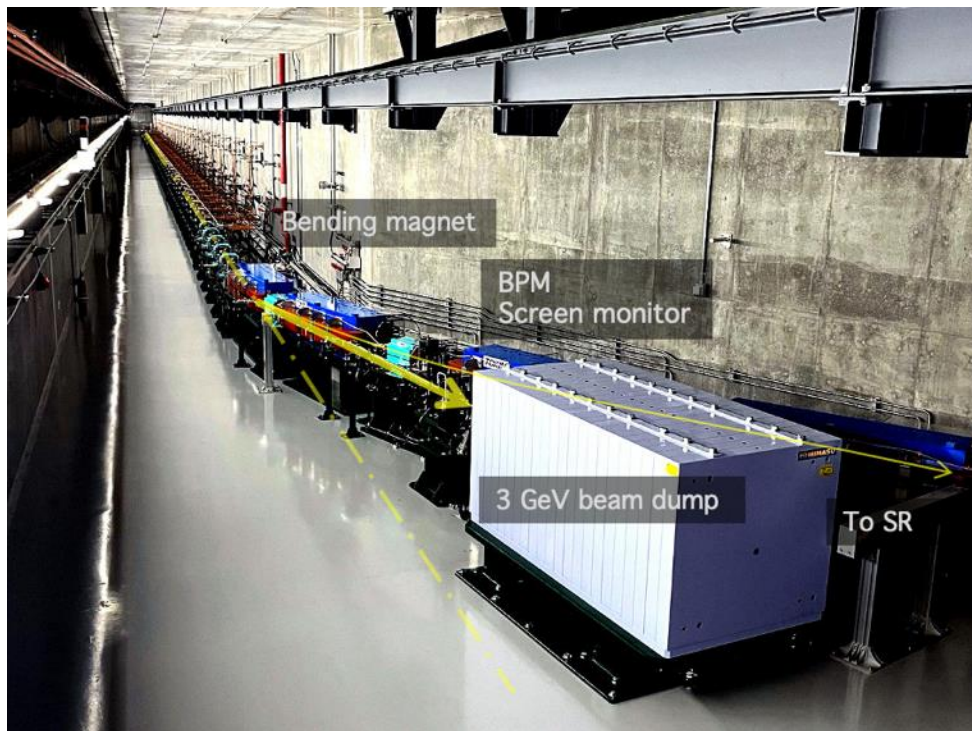
- ・ 全長4.2 mのコンパクトデザイン
 - ・ 低エミッタンスビームの生成
 - ・ RF機器の最小化
- 238 MHz加速空洞、476 MHz SHB、SB加速管
- ・ ビーム調整の簡単化 (合理的手法に基づくビーム調整)
- 機能分離型 (磁気レンズ、加速電場)
- ビーム安定生成に寄与
- 優れた保守性、故障率の低減、...

◆ 速度変調 (エネルギー変調) バンチング

- ・ 300 ps (FWHM)、50 keV @50 kV電子銃
- ・ 300 ps (FWHM)、480 keV @238 MHz acc. cav.
- ・ 10 ps (FWHM)、320 keV after 476 MHz SHB
- ・ 5 ps (FWHM)、470 keV @1 cell of SB acc.

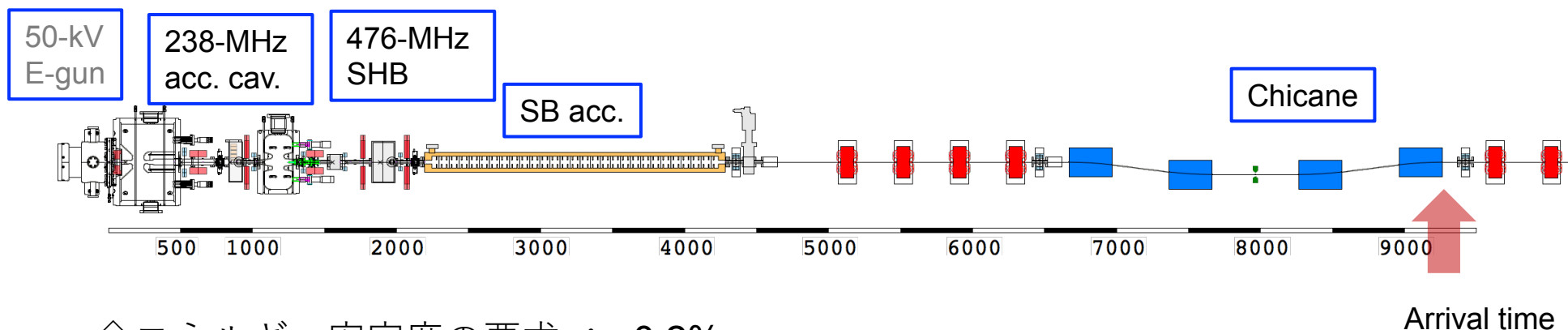
ビームパラメータ	要求値	シミュレーション	測定値
ビーム電荷量	0.3 nC	0.4 nC	0.48 nC
規格化エミッタンス	< 10 mm mrad	7 mm mrad	7~14 mm-mrad
バンチ長 (FWHM)	< 5 ps	5 ps	-
ビームエネルギー	> 30 MeV	40 MeV	40 MeV

主加速部 3 GeVビーム調整



- ◆ 加速管で得られるビーム誘起信号測定
 - ・ビーム誘起信号振幅が最大となる位相を測定
 - ・検出位相に対して、 $\pm 180^\circ$ が加速位相
- ◆ 3 GeV偏向電磁石後のBPMによる重心エネルギー測定
 - ・全加速ユニットの位相スキャンでエネルギー最大化

RF機器の安定性の必要性



◇エネルギー安定度の要求： $<0.2\%$

✓ Cバンドユニットの安定度、振幅 $<0.2\%$ 、位相 <2.5 degree (~ 1.2 ps)

⇒現状のCバンド機器は安定性を満たしている

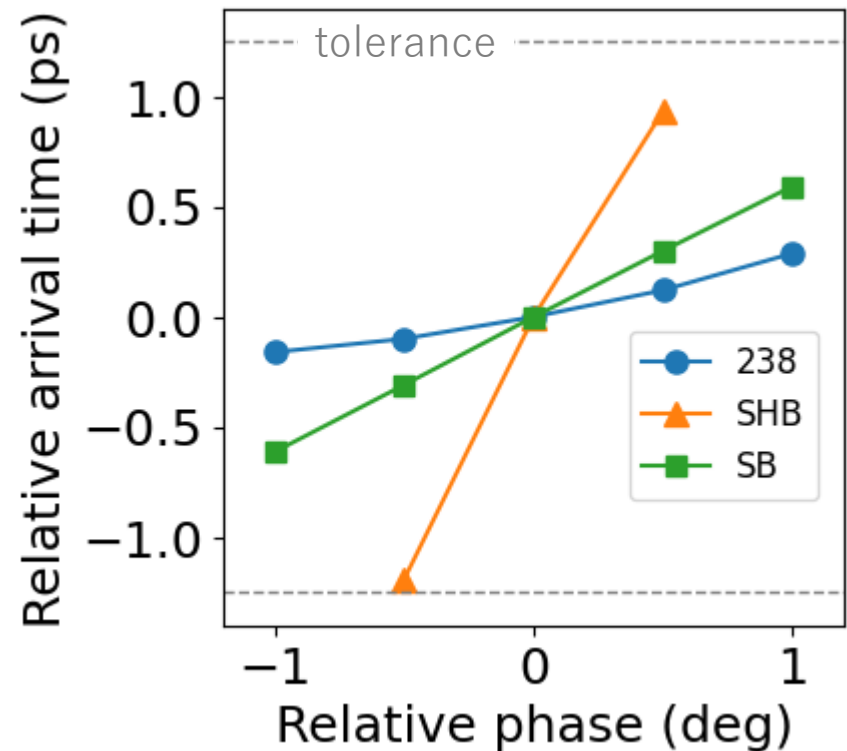
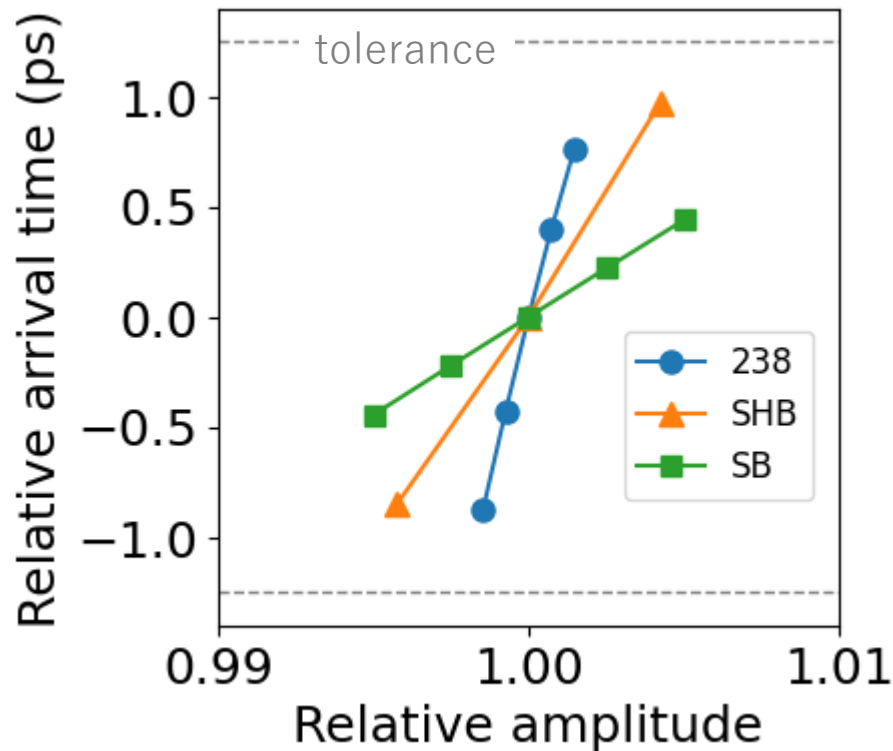
• Cバンド加速管への到達時刻の変動： ± 1.25 ps以内

- 電子銃からSバンド加速管までは、非相対論領域のために電子速度が変化
- エネルギー変動によるシケイン部経路差の変化

各RF機器の振幅・位相変化の到達時刻に対する影響の見積と安定性の測定を行った。

PARMELAによる到達時刻のシミュレーション

238 MHz空胴, SHB, SB加速管の振幅・位相の影響



*傾きの符号を揃えて表示

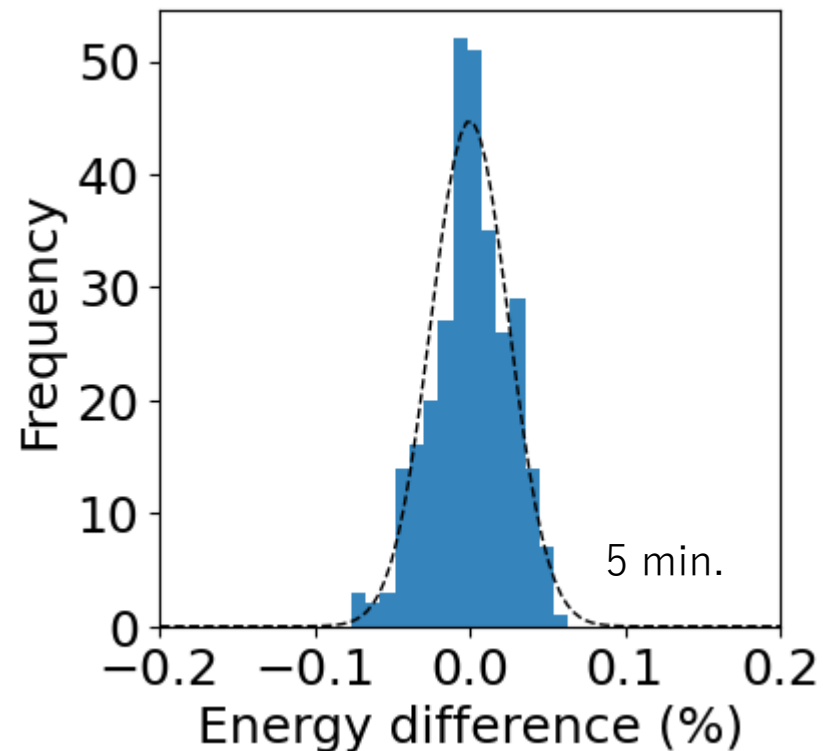
238 MHz空胴の振幅、SHBの位相の変動による到達時刻への影響が大きい。

RF機器およびビームエネルギーの安定性の測定

振幅・位相の安定性の
要求および測定値

3 GeVビームエネルギーの
安定性

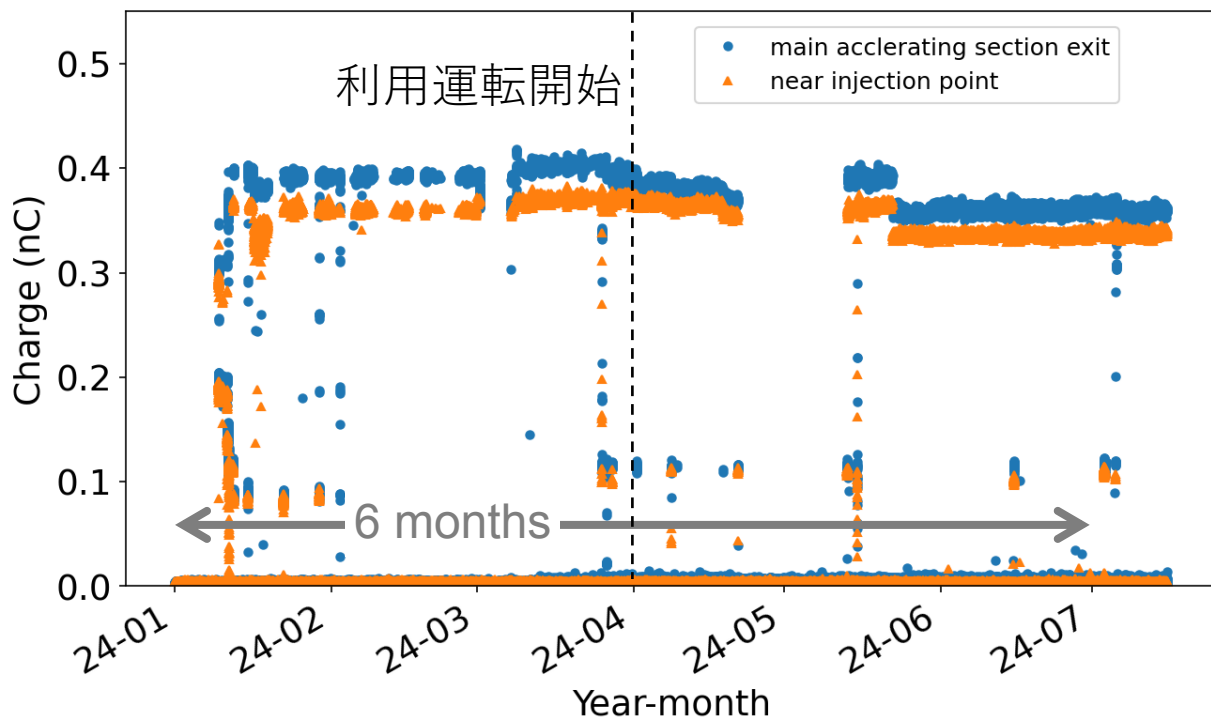
Components	Requirement*		Measurement	
	Amp. (%)	Phase (degree)	Amp. (%)	Phase (degree)
238 MHz cavity	± 0.08	± 0.5	0.033	0.034
SHB	± 0.15	± 0.2	0.022	0.065
S-band	± 0.3	± 0.5	0.029	0.060
C-band	± 0.1	± 2.5	0.037	0.058



- 振幅・位相の安定性の要求を満たしている。
- ビームエネルギー安定性0.02% (rms)が得られている。

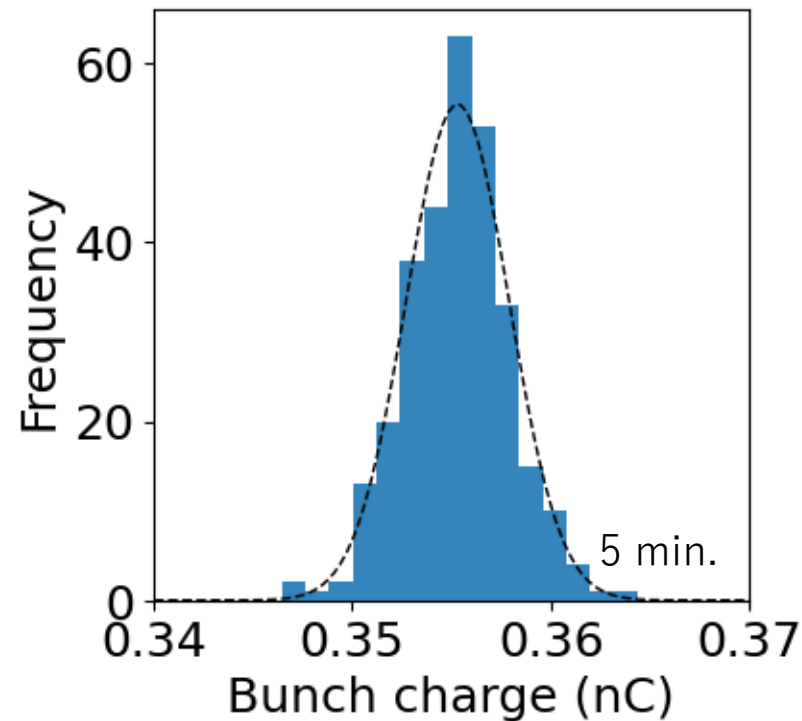
ビーム電荷量の推移・安定性

約6ヶ月間の推移
(線型加速器終端と入射点近辺)



- 24-04の減少：加速ユニット1台が不調になり始め、加速電圧のみを調整
- 24-05の減少：コリメータで電荷量を制限
- 0.1 nC：低電荷量で調整

電荷量の安定性

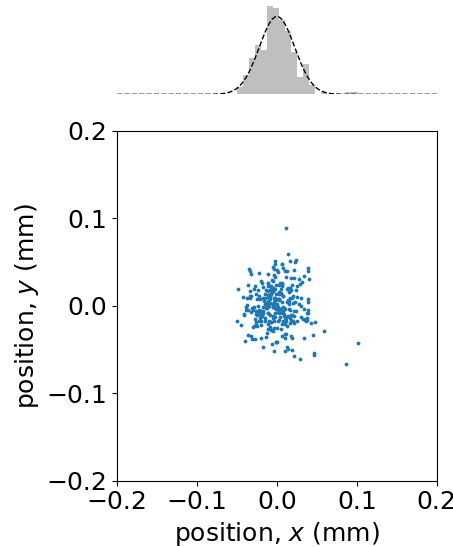
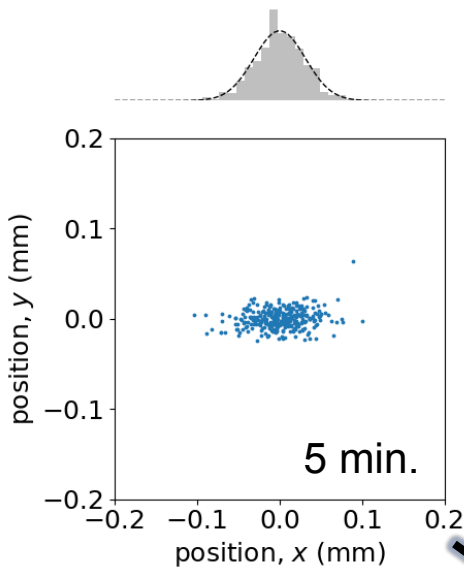


ビーム電荷量の安定度：
0.72% (rms, ct, cb6)

ビーム位置の安定性

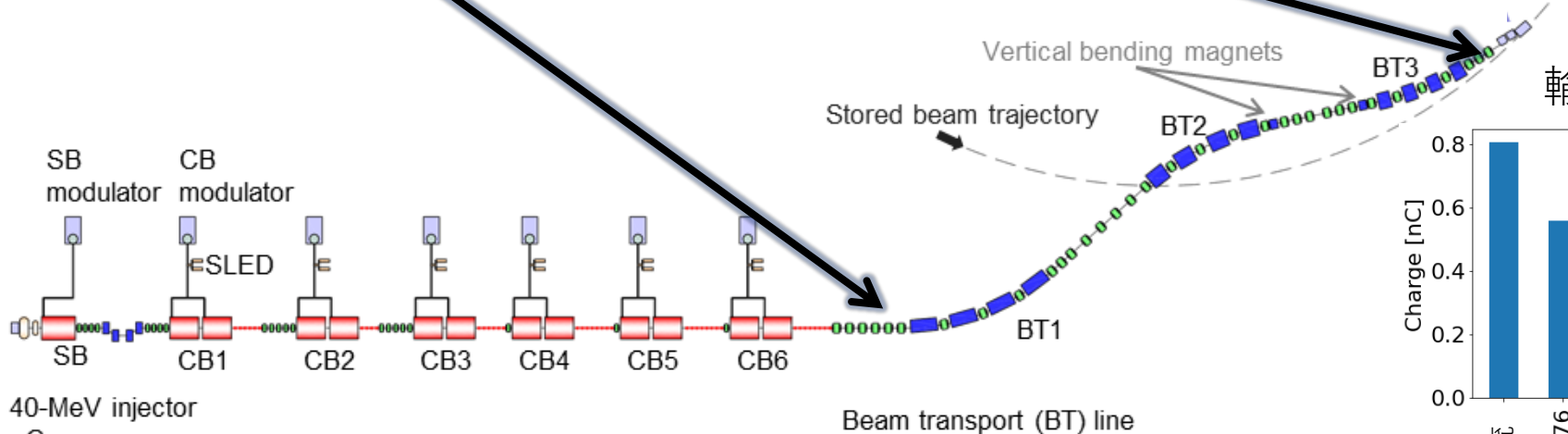
線型加速器終端

入射点近辺



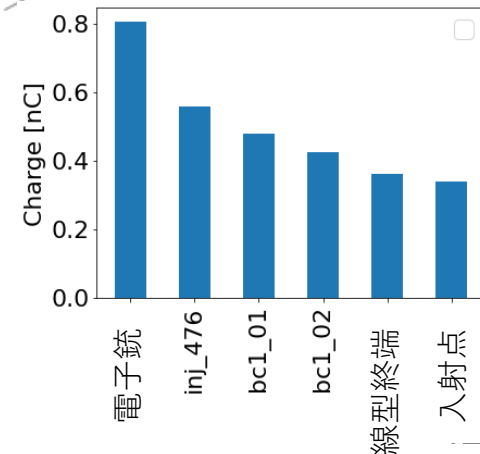
ビーム位置の安定度 (5分間)

- 線型加速器終端で31 / 11 μm (x/y, rms)
非対称の原因を調査中
- 入射点近辺で22 / 24 μm (x/y, rms)
パルスセプタムを十分に通過
(ビーム径150 μm (y)、開口y 4mm)

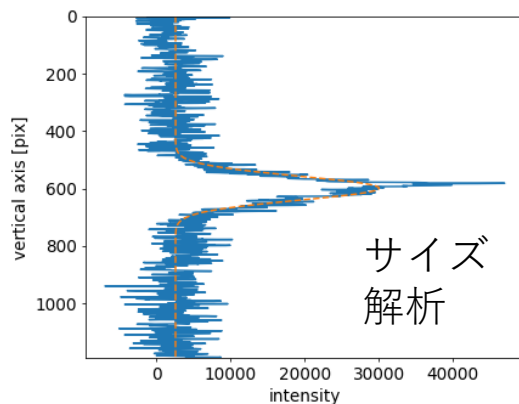
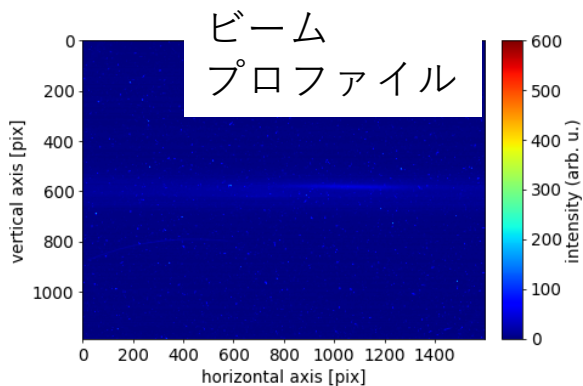


40-MeV injector
- Gun
- 238 MHz cavity
- SHB

輸送電荷量



Twissパラメータ測定 (40 MeV, 入射部)



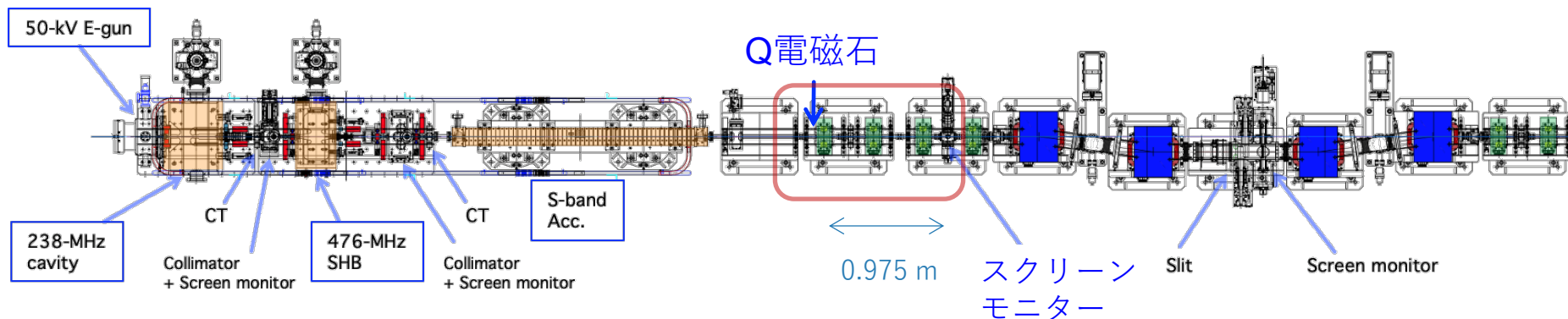
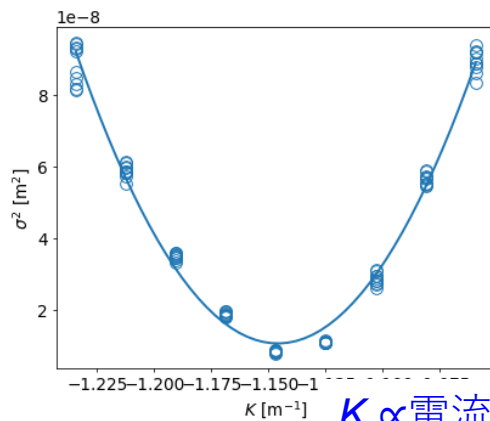
Twiss parameter

$\epsilon_{n, x}$	6.1 mm mrad
$\epsilon_{n, y}$	13.9 mm mrad
β_x	23.1 m
β_y	9.9 m
α_x	-0.50
α_y	-0.21

0.48 nC

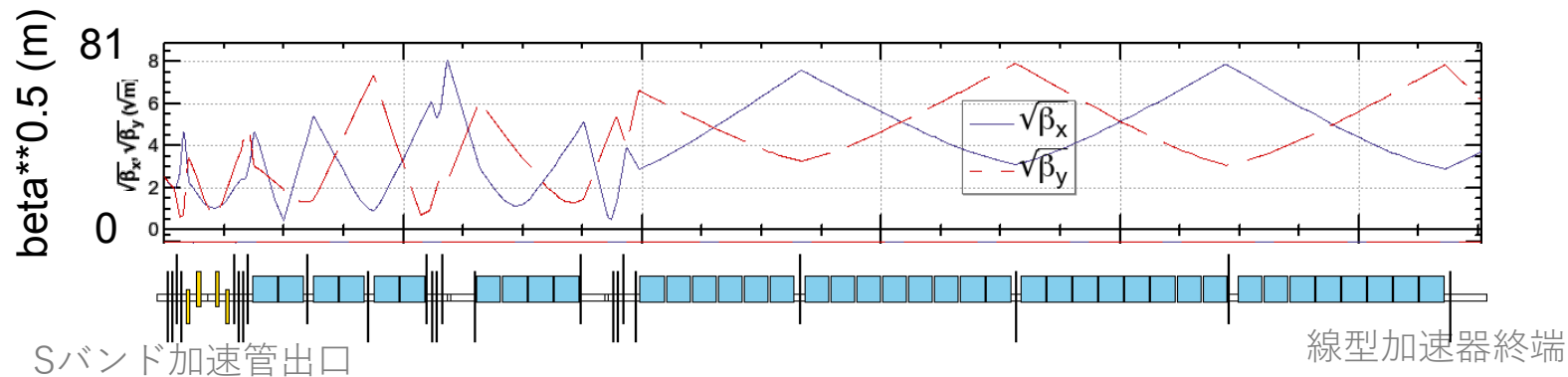
y方向の
測定の例

ビームサイズ²

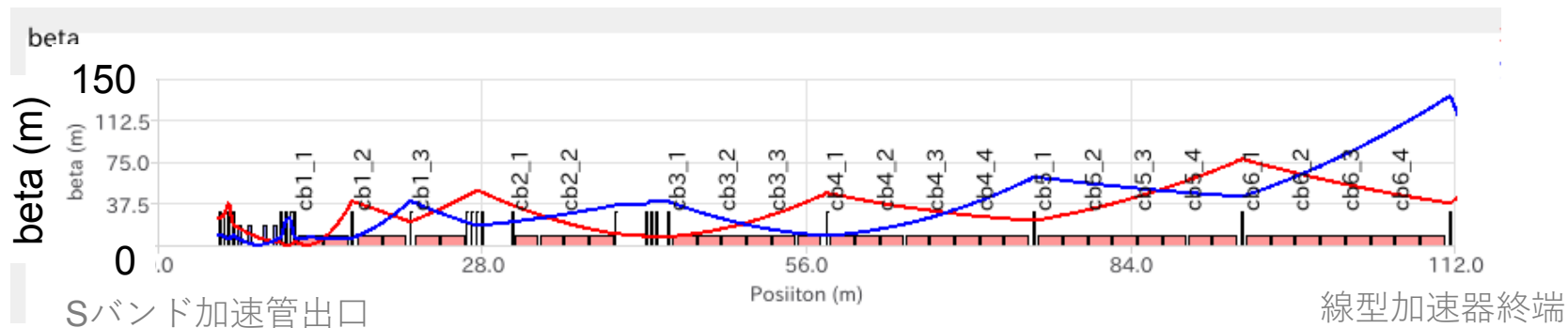


線型加速器のオプティクス

ベータ関数（設計値）*



ベータ関数（現状）

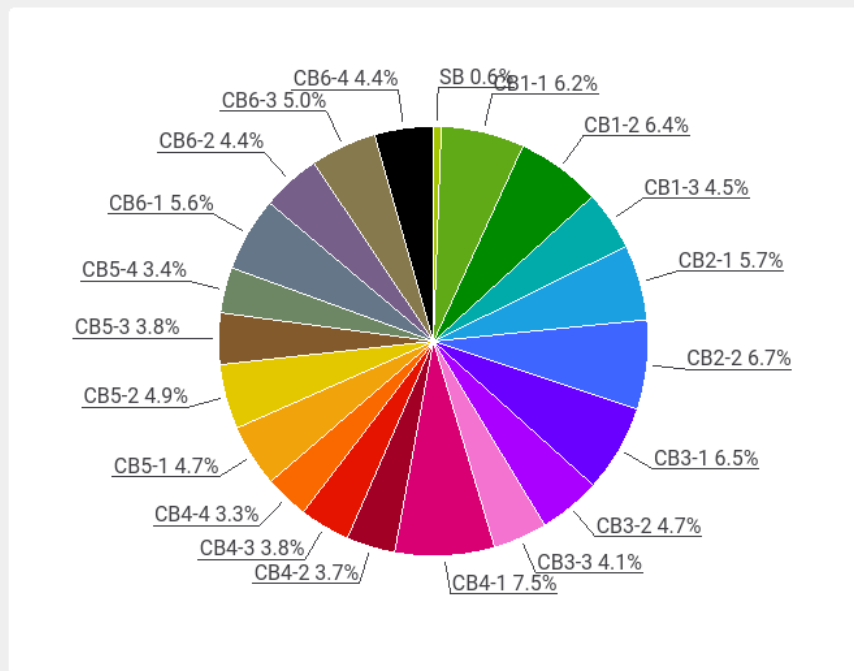


- Sバンド加速管の出口のツイスパラメータおよび電磁石を反映したシミュレーションを行い、輸送できることを確認した。
- 今後、FODOを設計値に近づけることを目指している。

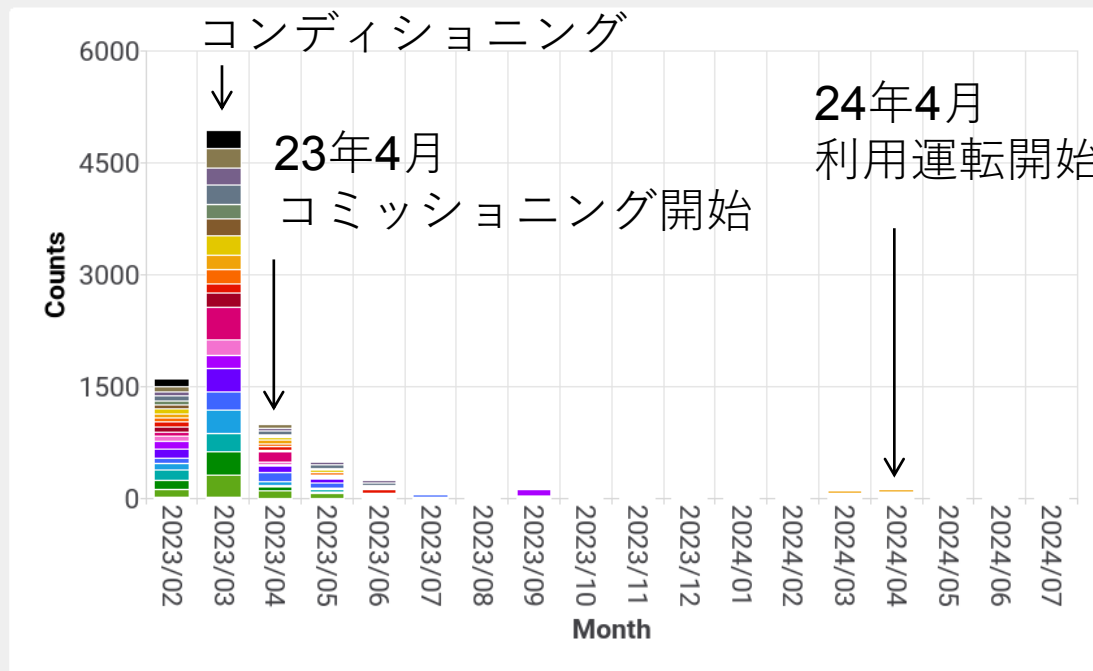
Sバンド・Cバンド加速ユニット（20台）の停止頻度

各ユニットの割合

停止頻度の推移(23年2月～24年7月)



Percentage of HV fault counts in all units from 2023 to 2024



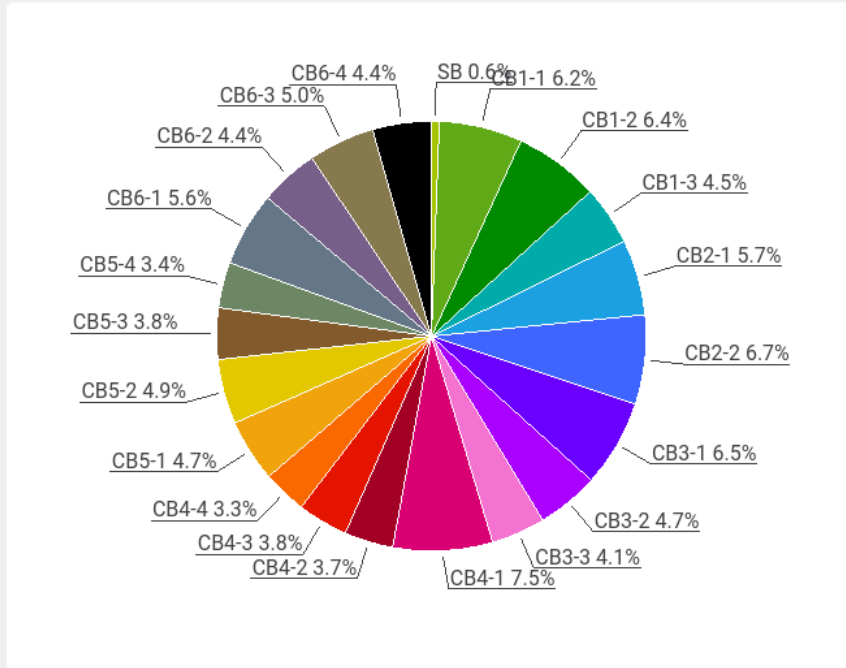
Number of HV fault counts in all units from 2023 to 2024

- 停止頻度はコミッショニング開始以降は減少傾向
- 現在は1日に1回程度の加速ユニットの停止頻度
- 今後、問題の早期発見のための監視、充放電の低繰り返し化と停止頻度の低減

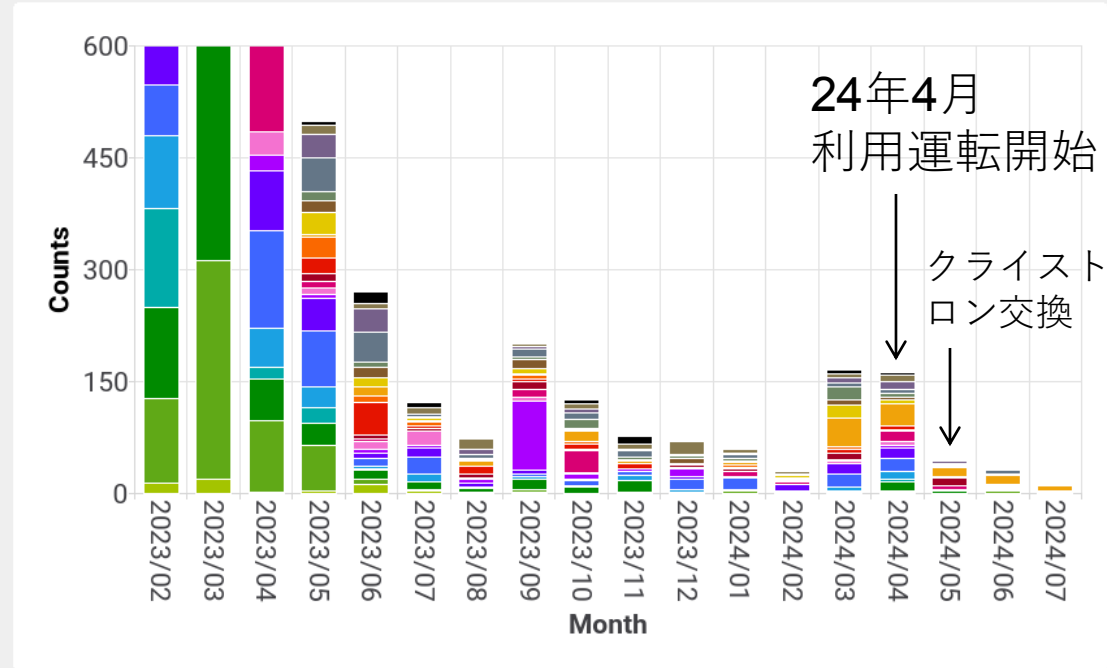
Sバンド・Cバンド加速ユニット（20台）の停止頻度

各ユニットの割合

停止頻度の推移(23年2月～24年7月)



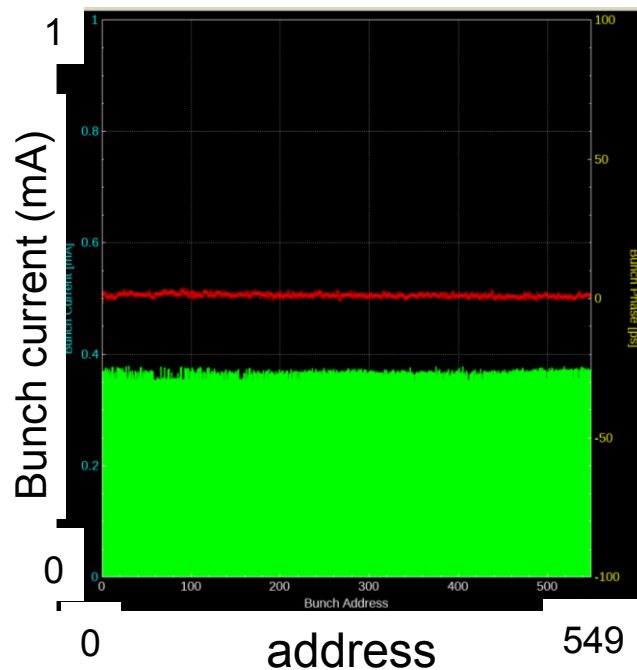
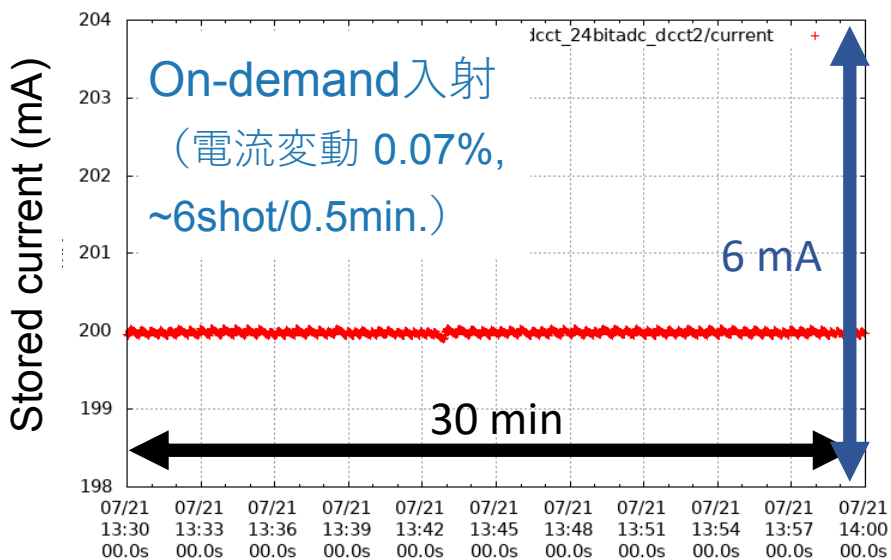
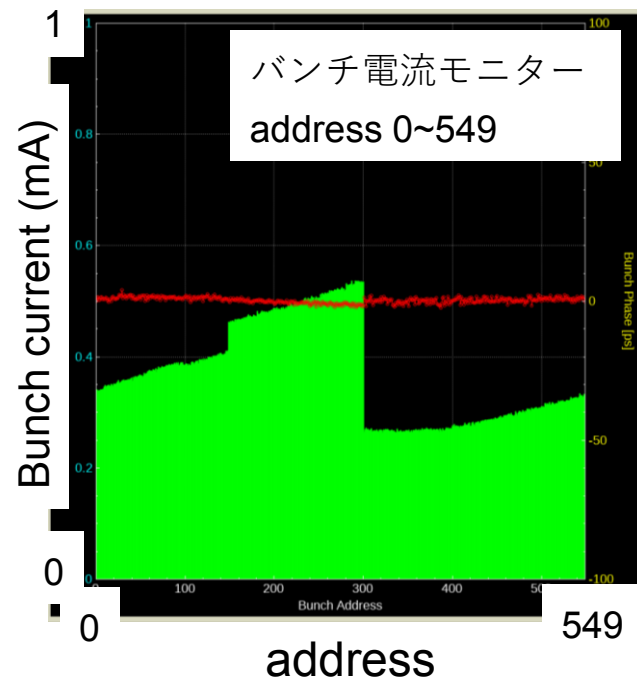
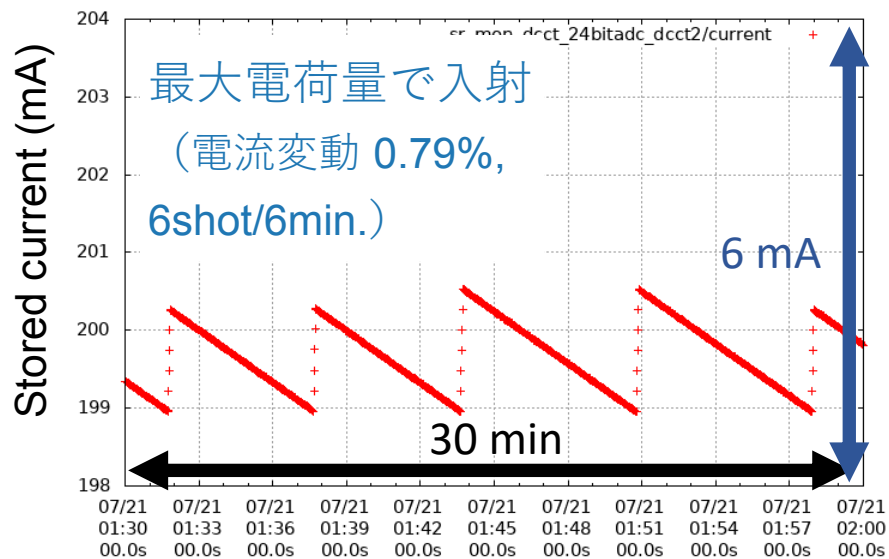
Percentage of HV fault counts in all units from 2023 to 2024



Number of HV fault counts in all units from 2023 to 2024

- 停止頻度はコミッション開始以降は減少傾向
- 現在は1日に1~2回程度の加速ユニットの停止頻度
- 今後、問題の早期発見のための監視、充放電の低繰り返し化と停止頻度の低減

全蓄積電流 (200 mA) とバンチ電流



電荷量調整により均一なバンチ電流分布も可能

まとめ

3 GeV線型加速器の安定性 および主要パラメータ

Items	Requirement	Measurement
Beam energy	3 GeV	3 GeV
Energy spread	0.16% (FWHM)	0.04%
Energy stability	<0.2%	0.02%
Bunch charge	0.3 nC/bunch	0.36 nC/bunch
Bunch charge stability	-	0.72%
Injection efficiency	-	88%*
Normalized emittance	10 mm mrad	6.1 mm mrad (H) 13.9 mm mrad (V)
Pulse repetition rate	1 Hz	1 Hz

NanoTerasuにおける線型加速器のビーム安定性の評価を行った。

- RF機器の振幅・位相の影響の見積・評価、エネルギー安定性 0.02% (5分間)
- 電荷量安定性 0.72%、入射点近くのビーム位置の安定性~23 μm (rms) (5分間)
- 要求に近いエミッタンス (規格化で10 mm mrad) の達成
- オプティクスを最適化中
- 加速ユニットの停止頻度、入射の様子

今後の予定

- オプティクスの最適化
- 各部でのツイスパラメータ測定

*S. Obara et al., " arXiv:2407.08925 [Physics.Acc-Ph], (2024)

**SPRING-8 (RIKEN, JASRI, SES)の加速器の方々、
NAT運転支援の方々に、深く感謝申し上げます。**