

SAGA-LS電子蓄積リングにおける
ビームロス発生時のビームプロファイル観測
Observation of the beam profile at the moment of
beam loss in the SAGA-LS storage ring

第18回日本加速器学会

SAGA-LS 岩崎能尊

Outline

- Introduction

ランプアップ時のビームロス ーどのような問題に取り組むのか？ー

- Method

PXIによる観測システムの拡張

- Result

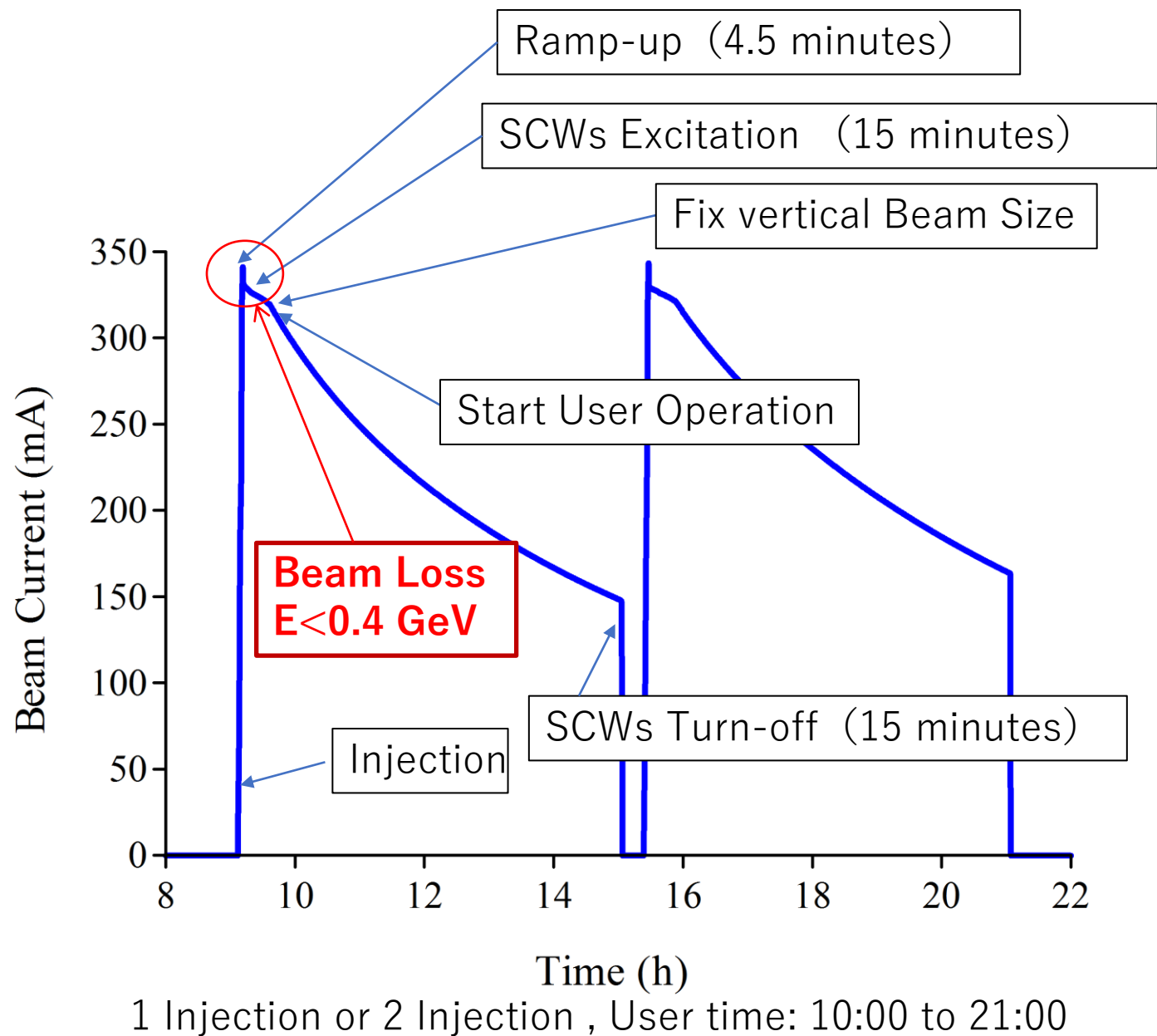
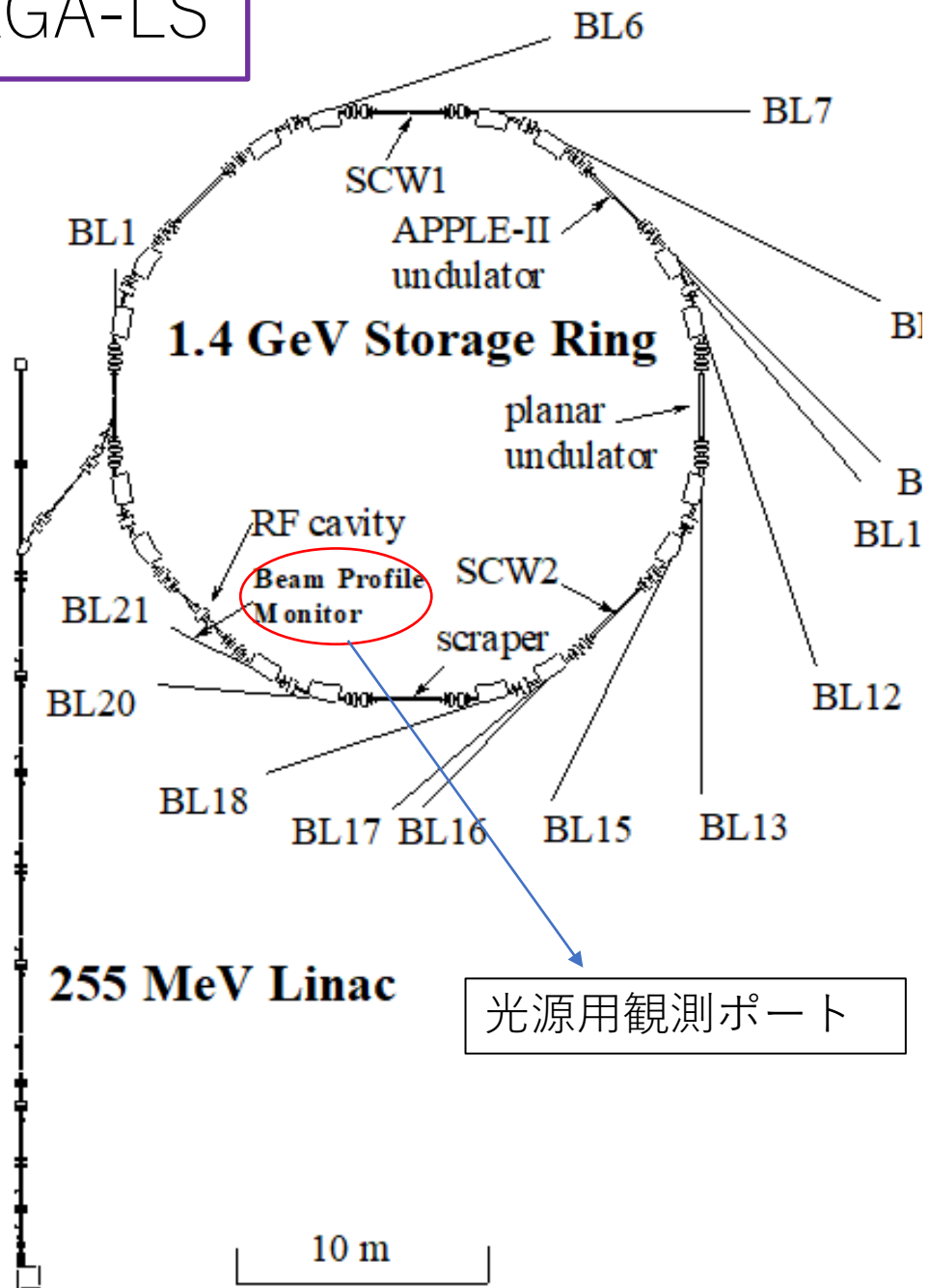
ビームプロファイル形状の変化と
他のパラメーターの同時観測結果

- Summary

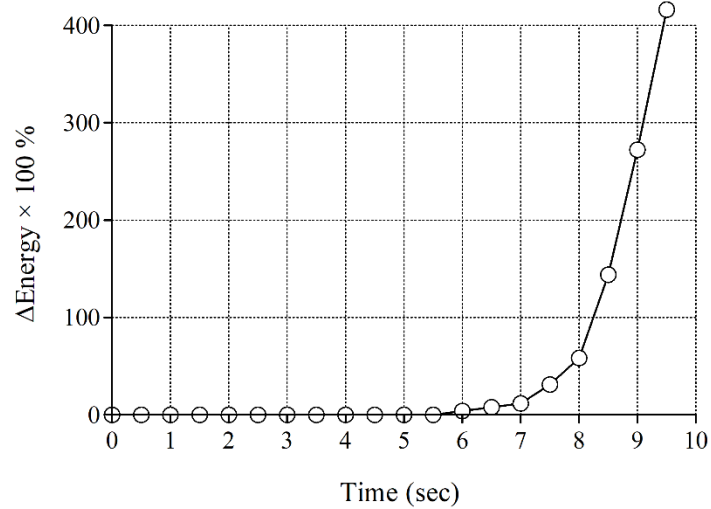
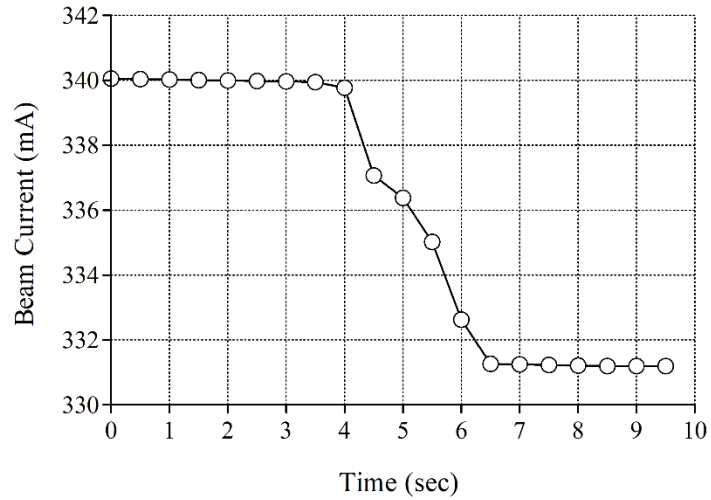
- Future plan



SAGA-LS



加速直後に発生する不連続なビームロス



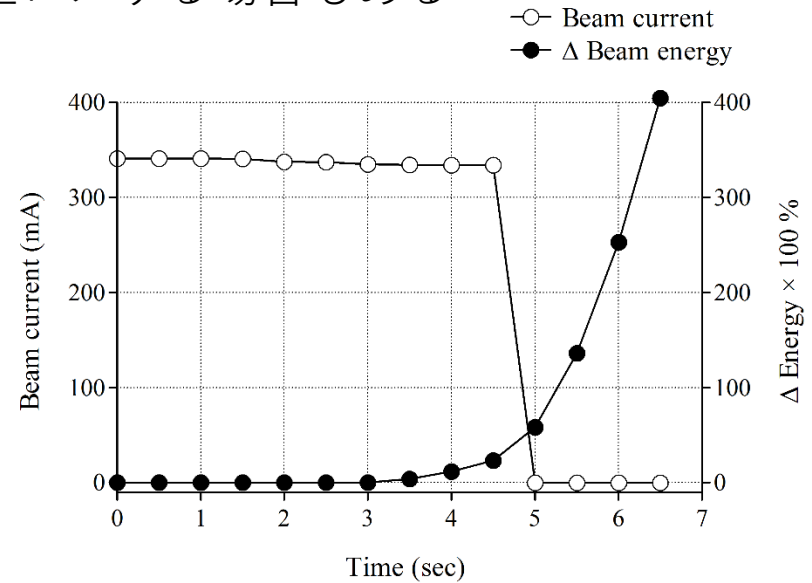
加速直後に10mAロスしたケース

・タウシェック寿命、真空寿命、量子寿命では説明できない

・ある蓄積ビーム電流以上で発生 ($I > 200 \text{ mA}$)

・加速直後に発生する ($E < 0.4 \text{ GeV}$)

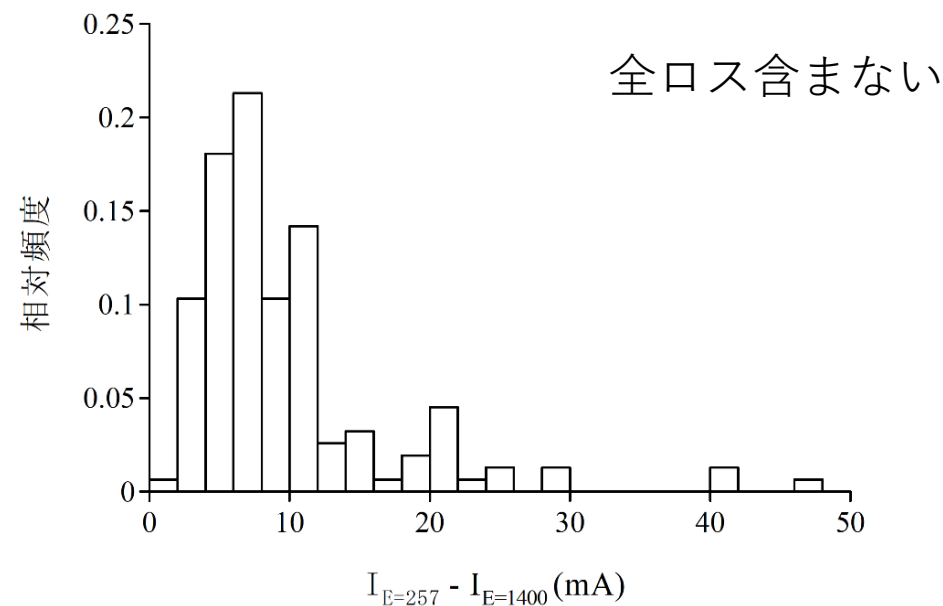
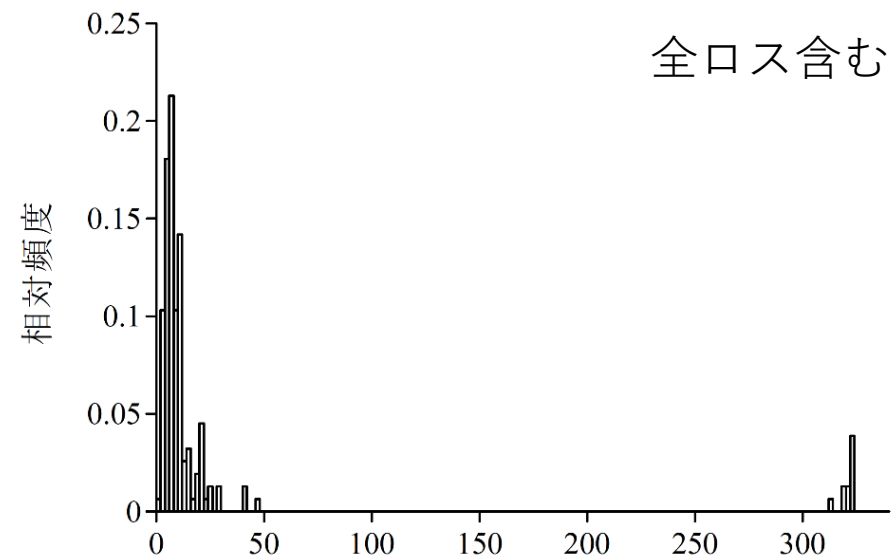
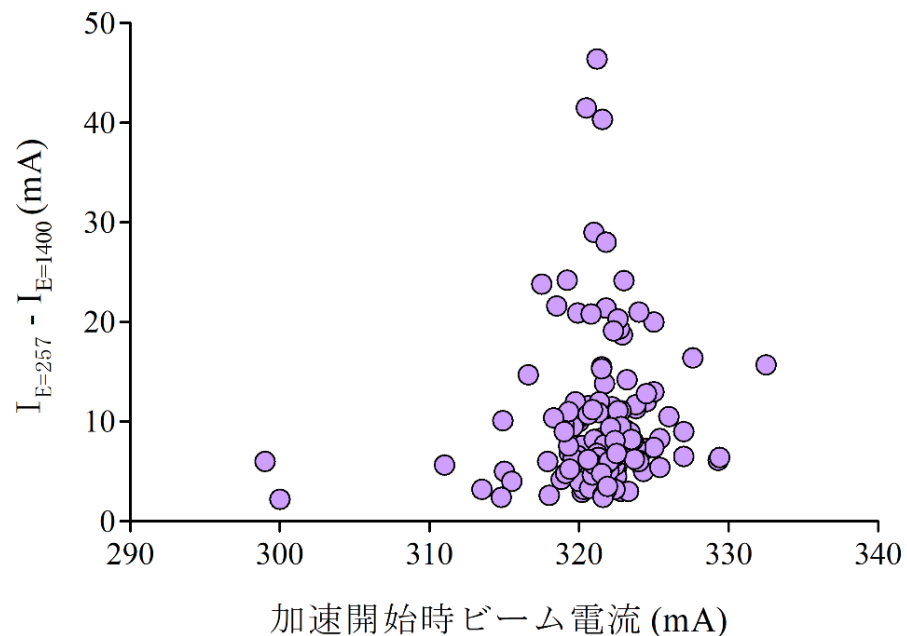
・ビームロス量にはバラつきがある ($\Delta I \sim 10 \text{ mA}$)
全ロスする場合もある



全ロスしたケース

ランプアップ時ビームロスの統計

2018年11月15日から2019年7月12日にかけてのユーザー運転（320mAランプアップ）



全ロス：10回

平均ビームロス量*（全ロス含む）：31.8 mA

平均ビームロス量*（全ロス含まない）：11.8 mA

*ランプアップ開始ビーム電流－1.4GeV到達時ビーム電流
（ナチュラルな減衰～2mA程度を含む）

ランプアップ開始直後のビームロス要因の特定と対策

目的：

- ・ビームロスの要因を特定し、対策することで更なる加速器運転の安定化を目指す。
- ・ランプアップに要する時間を縮小し、加速器運転のパフォーマンスを向上する。

方法：

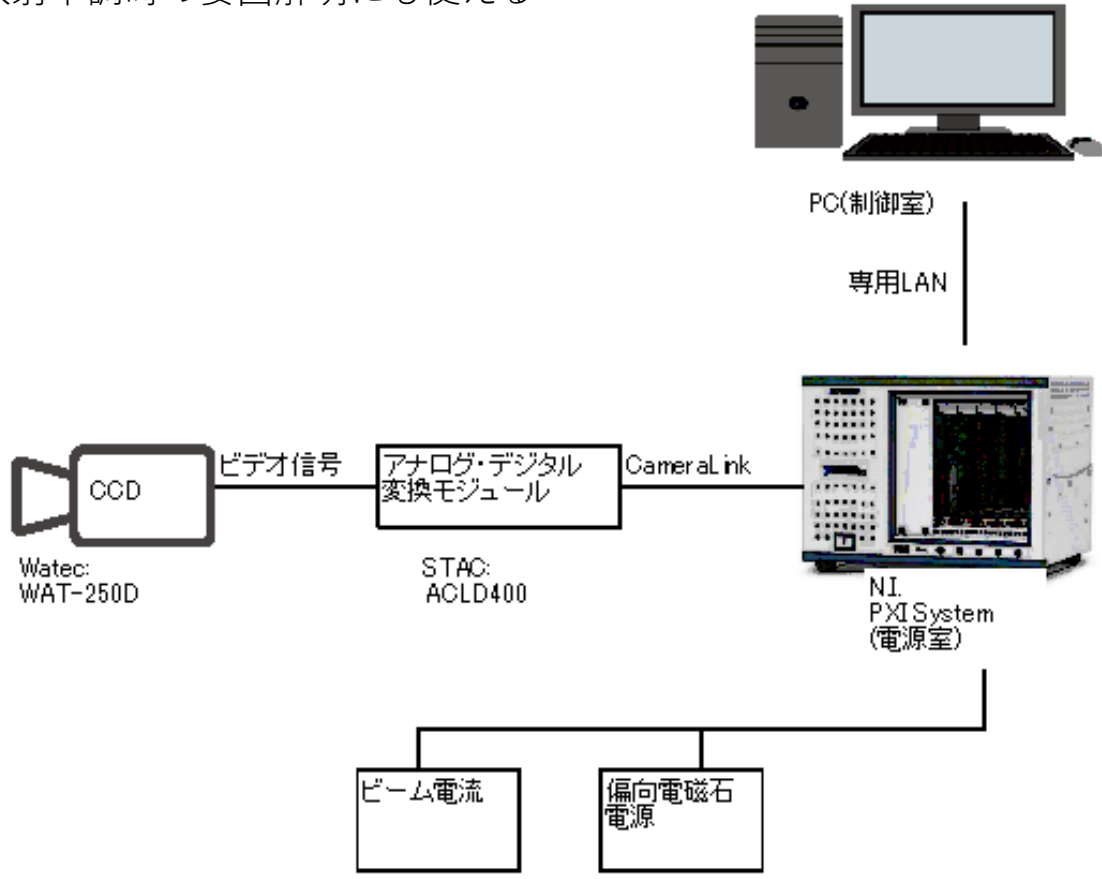
PXIを用いた速い計測系の整備により、ビームロスの要因を特定し対策を行う。
ビーム位置、電磁石電源、ビーム電流および**ビームプロファイルの同時観測**を行う。



ビームプロファイルモニタ：BL21光源用観測ポートCCD

方法：ビームロスメカニズムを解明するため、PXIシステムにてビームプロファイルを観測

ビームポジションモニタ (BPM) ではビームの重心位置情報しかわからない
入射不調時の要因解明にも使える



- ・蓄積リング室内→電源室CCDカメラビデオ信号ケーブルの敷設
蓄積リング室内で既存ケーブルより分岐
電源室BNC取り合いポートより電源室PXI置き場まで延長
- ・電源室→制御室 専用LANケーブルの敷設
既存の制御LANの負荷にならないように、専用線を新設 (ノイズシールドタイプ)
- ・アナログ・デジタル変換モジュール (ACLD400) 用カメラファイル作成 (N.I.協力)
PXIe-1435(Frame Grabber)にCameraLink信号を取り込むためのカメラファイル
- ・ビーム電流、偏向電磁石電源、その他リング主要電源出力のPXIへの取り込み
PXIe-4300, 16bit, 8ch, 250 kS/s
1kHzローパスフィルタ付きADC
他の物理量とビームプロファイルの同時観測。

・ノイズ対策
ノイズにより計測が途中で停止。PXI(LabVIEW RT)で稼働させているため、VIのエラークリアでは単純に対処できない。
ノイズは電源室内のビデオ信号部に発生していることが判明。→インラインノイズフィルターによりカット

・画像収録アプリケーション製作
ビームプロファイルのデジタル常時表示および記録が可能となった。画像のサンプリングそのものは60Hz以上で可能 (入力ソースに依存)。
ビームプロファイル画像はビーム電流、偏向電磁石電源出力と同時に計測可能。記録した画像のファイル名に自動的にタイムスタンプ、ビーム電流および偏向電磁石出力を記録。

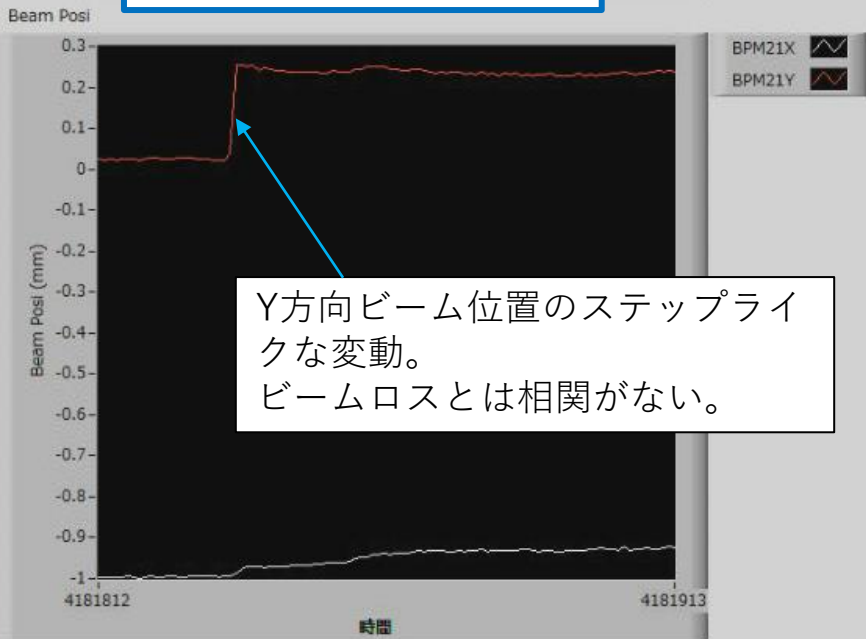


リモートPCでの表示状況

ビームプロファイル



ビーム位置

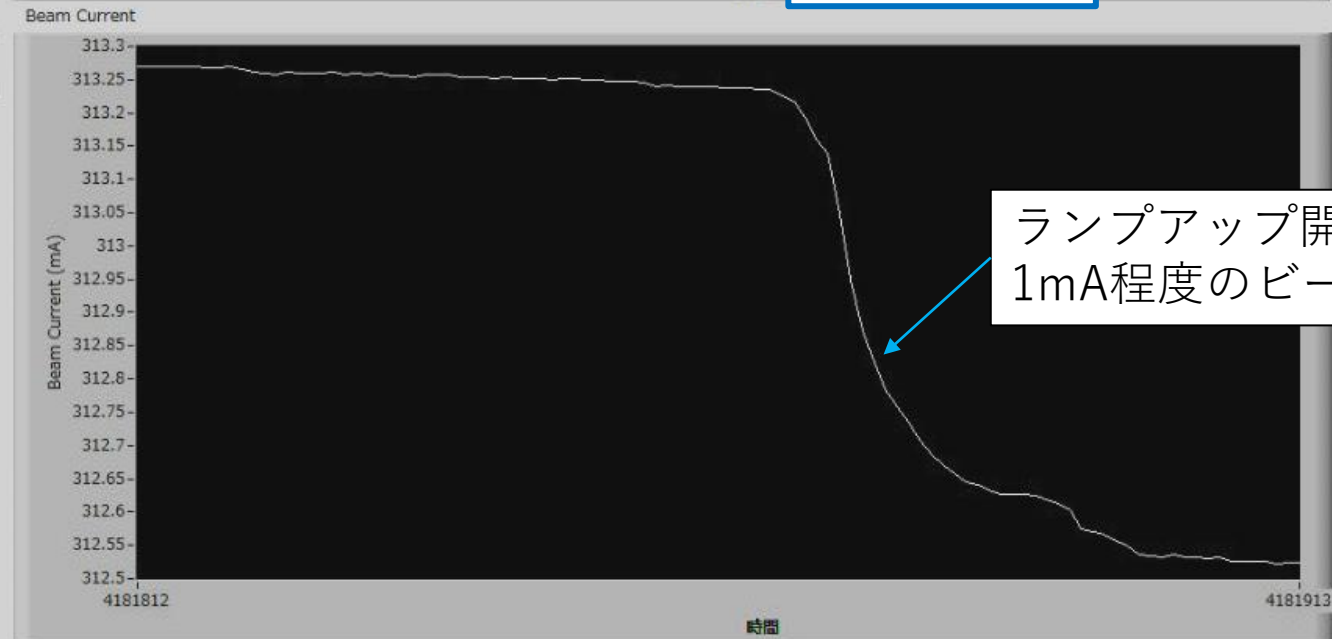


Y方向ビーム位置のステップライクな変動。
ビームロスとは相関がない。

リング主要電源



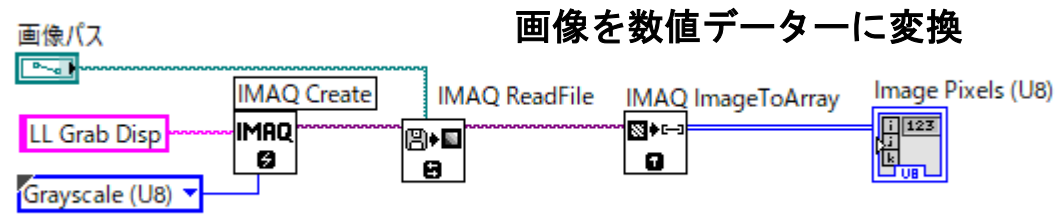
ビーム電流



ランプアップ開始直後の
1mA程度のビームロス

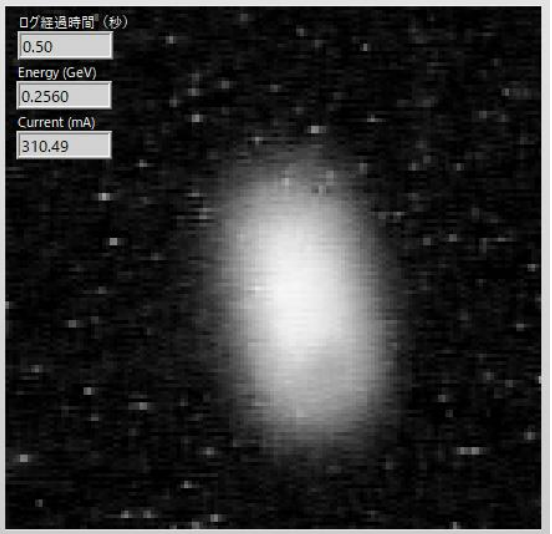
画像処理(LabVIEW)

- ・ビットマップ画像を数値データに変換
- ・ノイズ除去
- ・強度の等高線処理
- ・3D表示
- ・数値処理
ビームサイズ、重心位置、
最大・最小値など
ただし、絶対値の評価は難しい

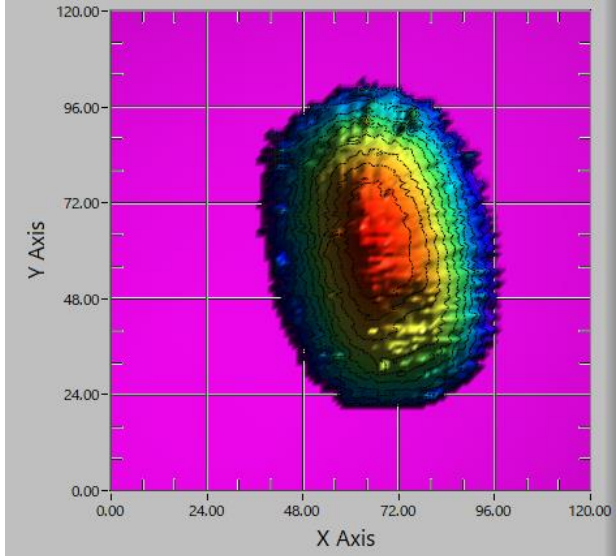


画像を数値データに変換

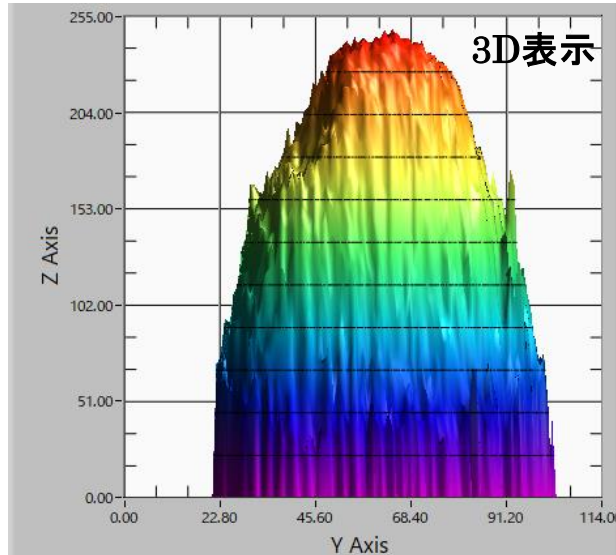
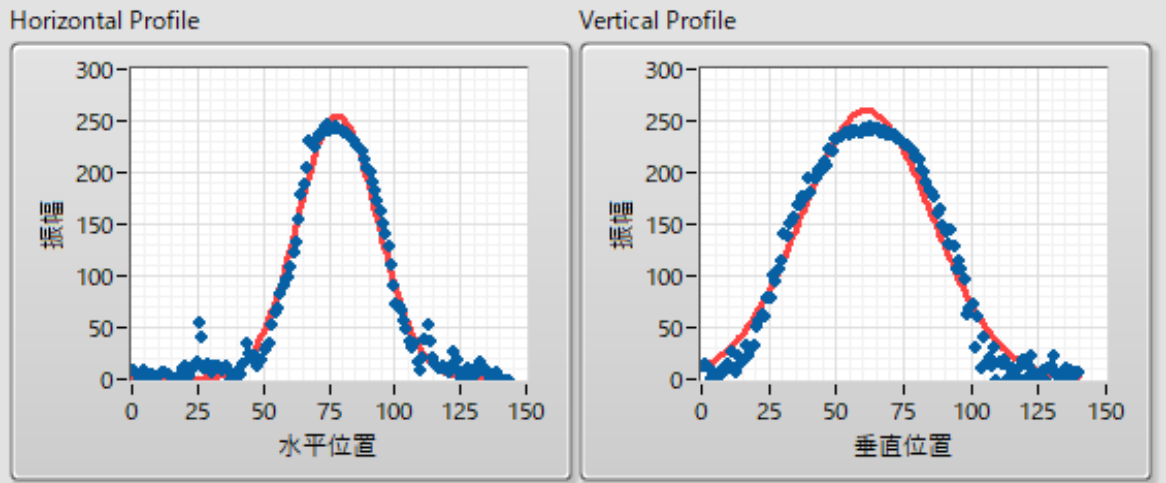
元画像



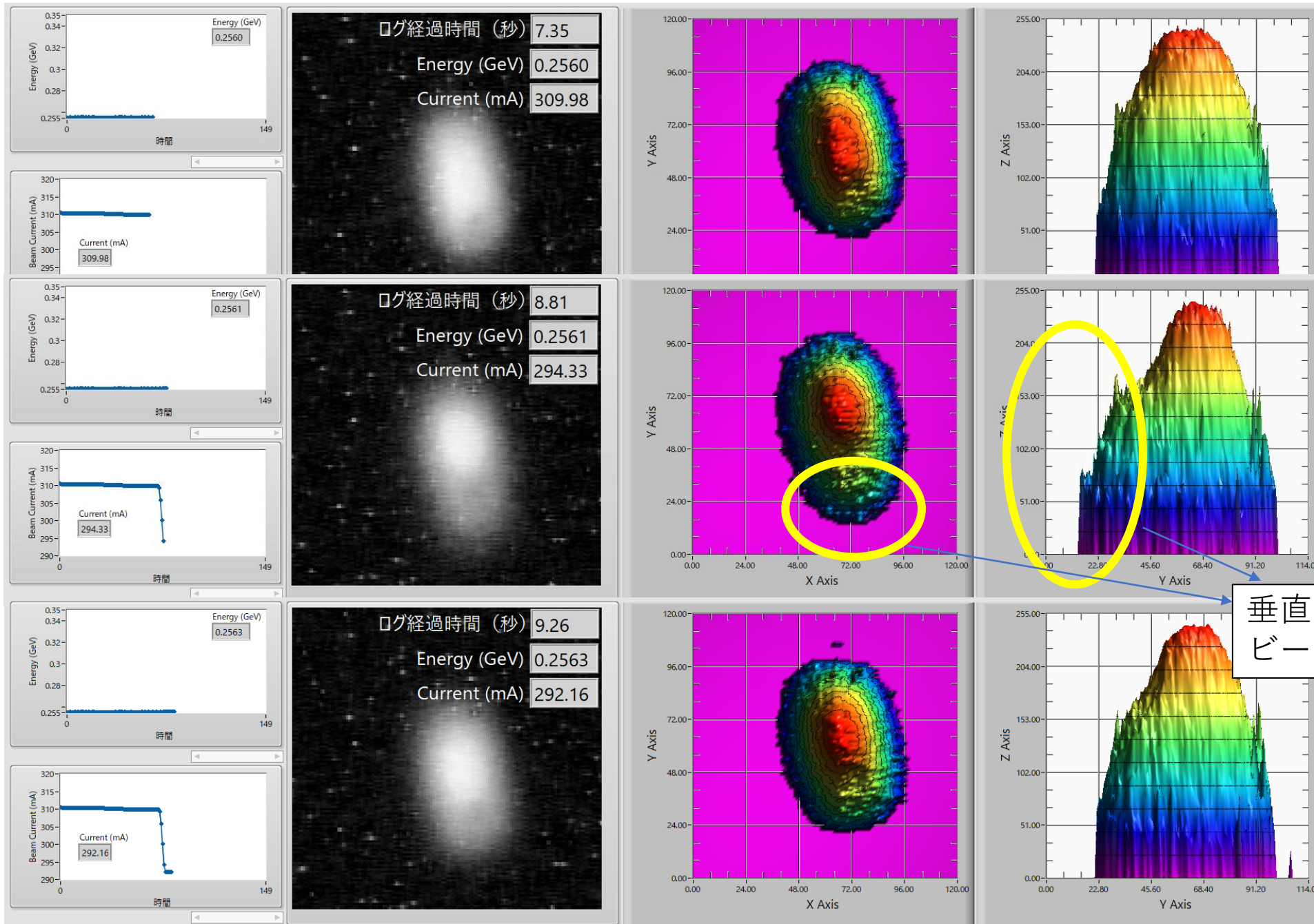
ノイズ除去 & 等高線処理



数値処理 (ガウシアンフィットなど)

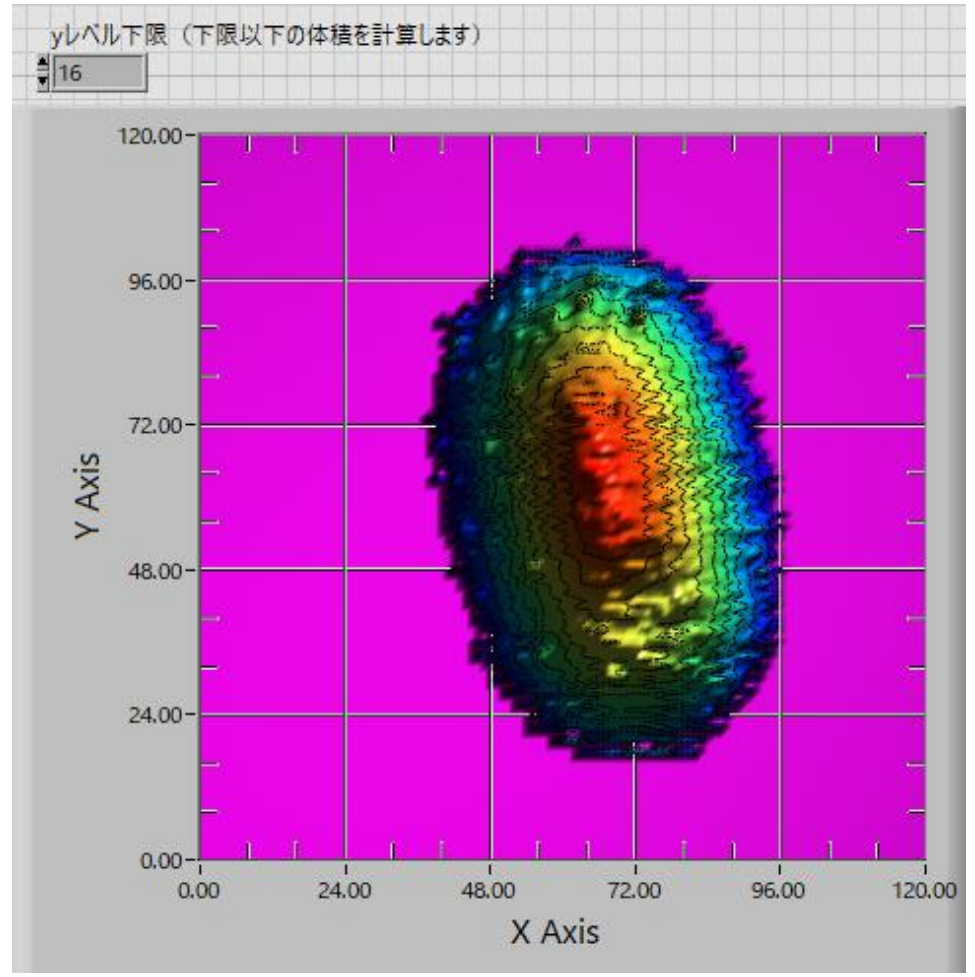
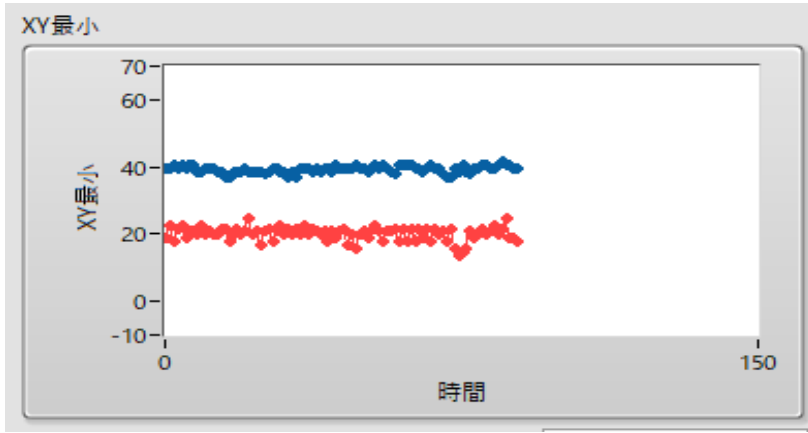
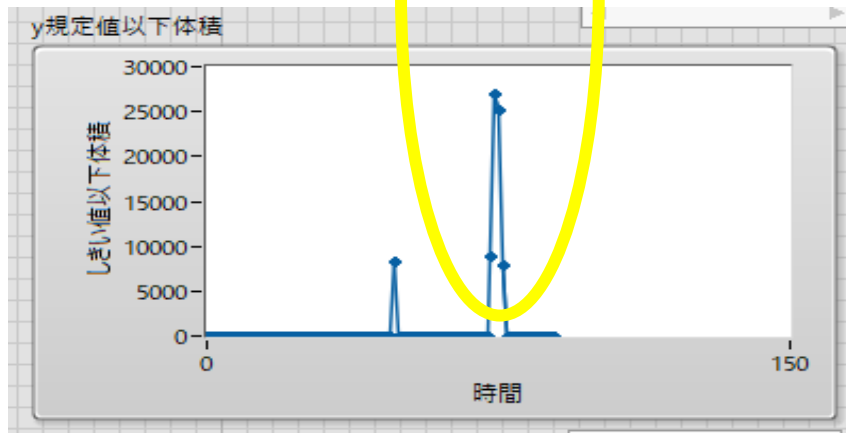
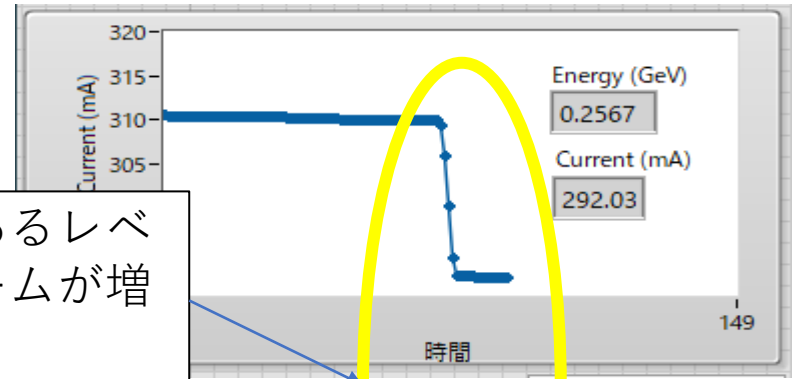


結果： ランプアップ開始直後のビームロス (2021/2/8 4-20mAロス)



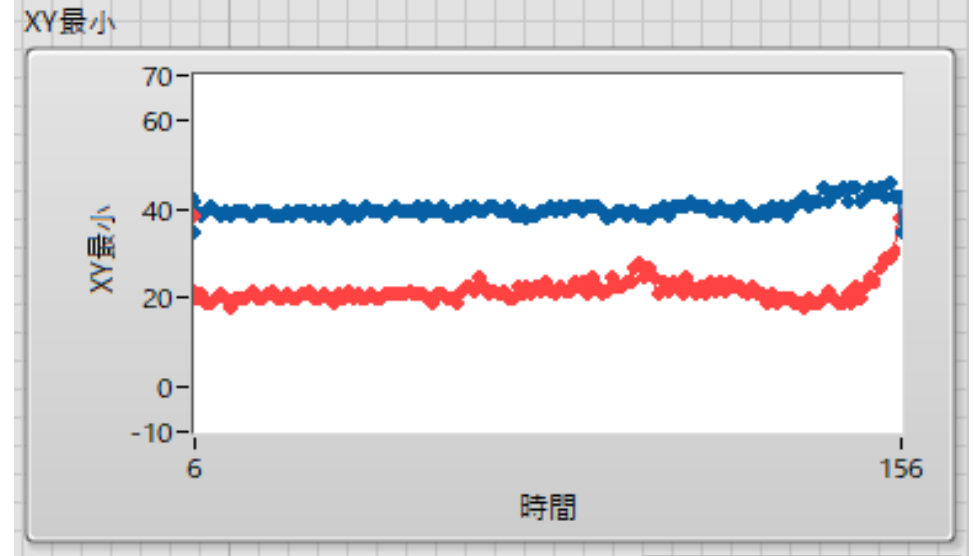
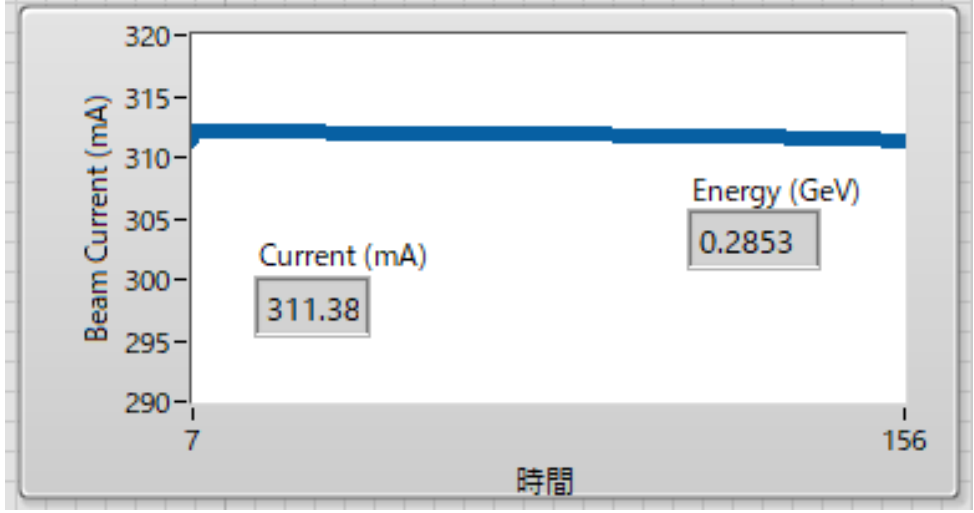
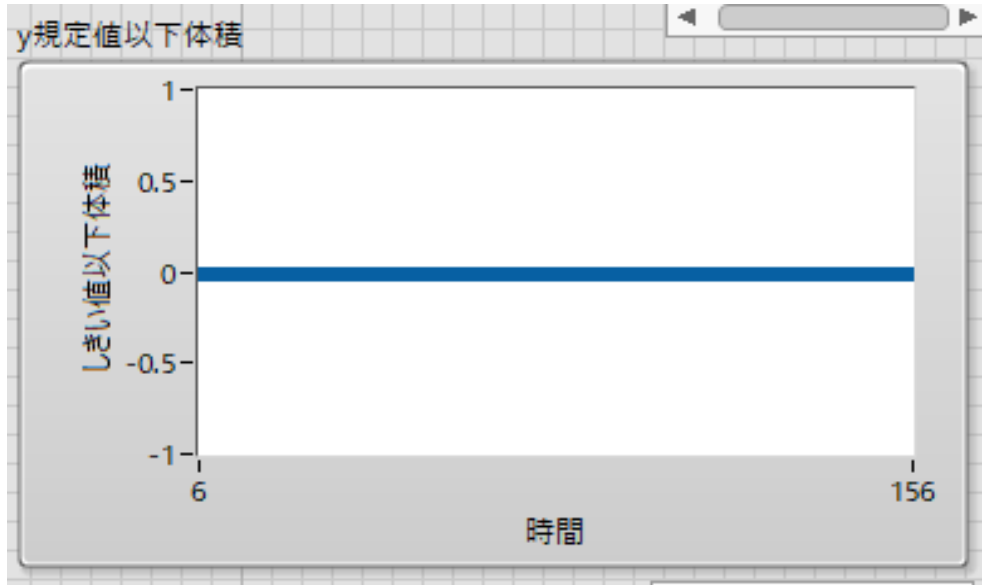
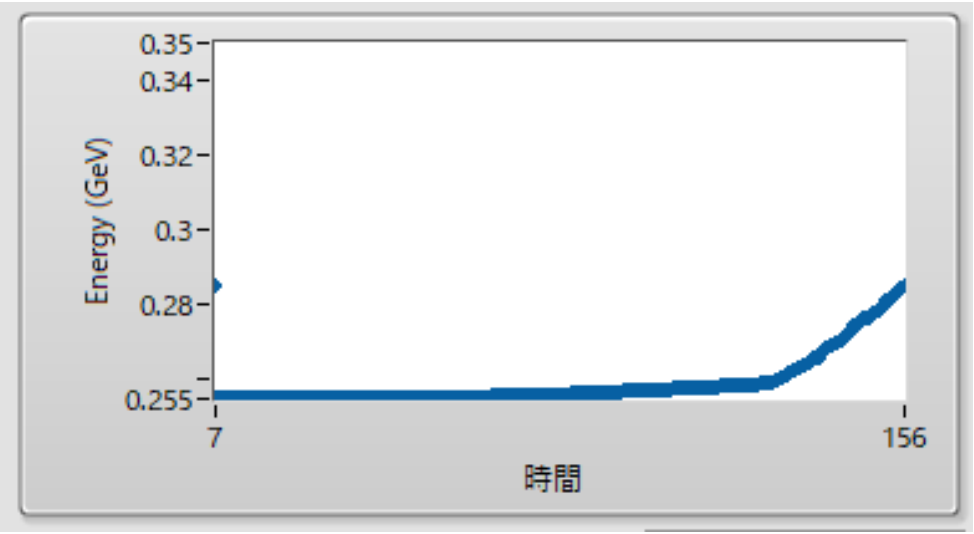
ランプアップ開始直後のビームロス (2021/2/8 20mAロス)

ビームロス時にあるレベル以下のボリュームが増加



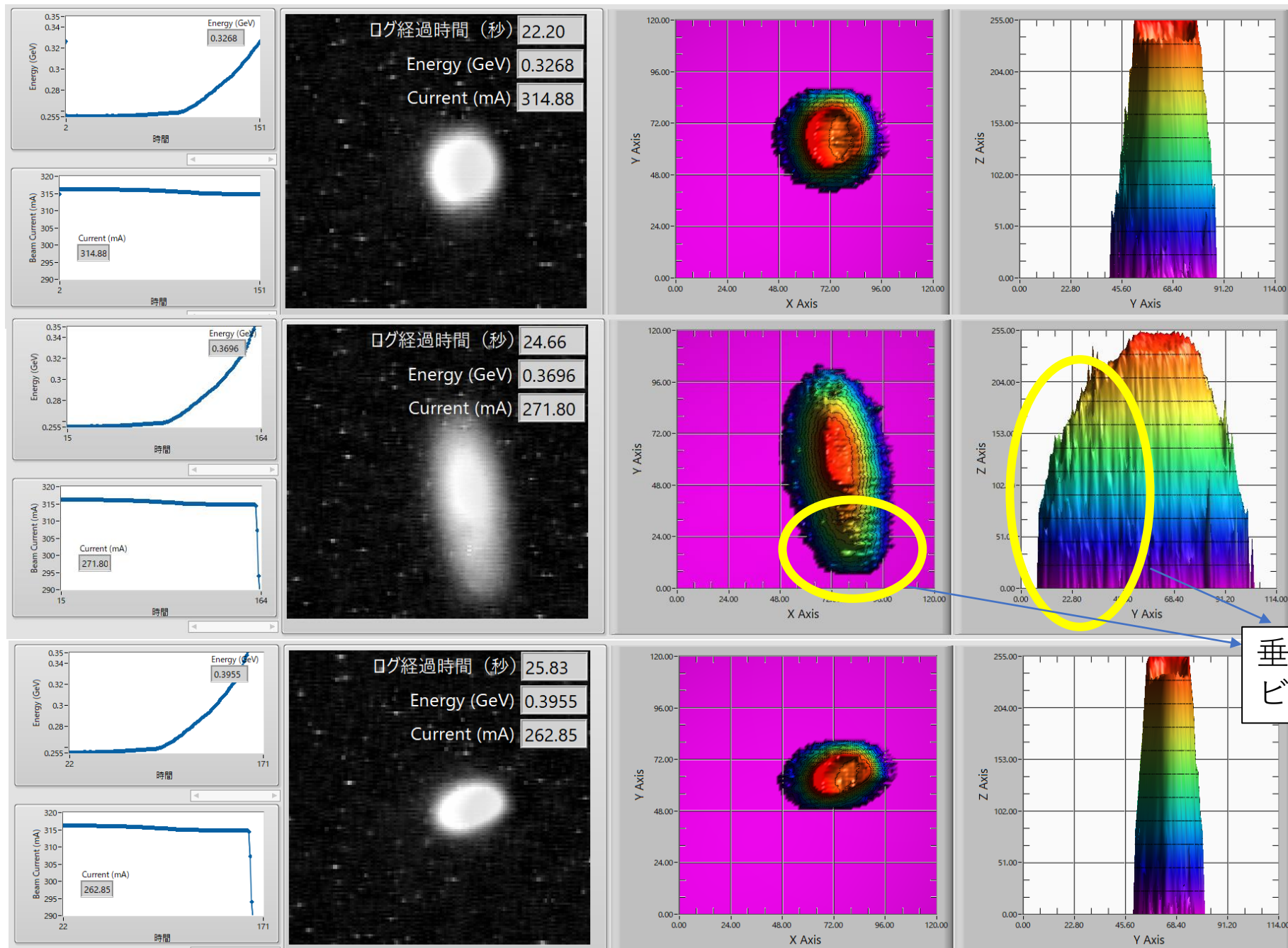
ランプアップ開始直後 (E~入射エネルギー) にビームロスが発生する場合は垂直方向ビーム広がりほぼ観測される。

ランプアップ開始直後にビームロスが発生しないケース (2021/3/30)



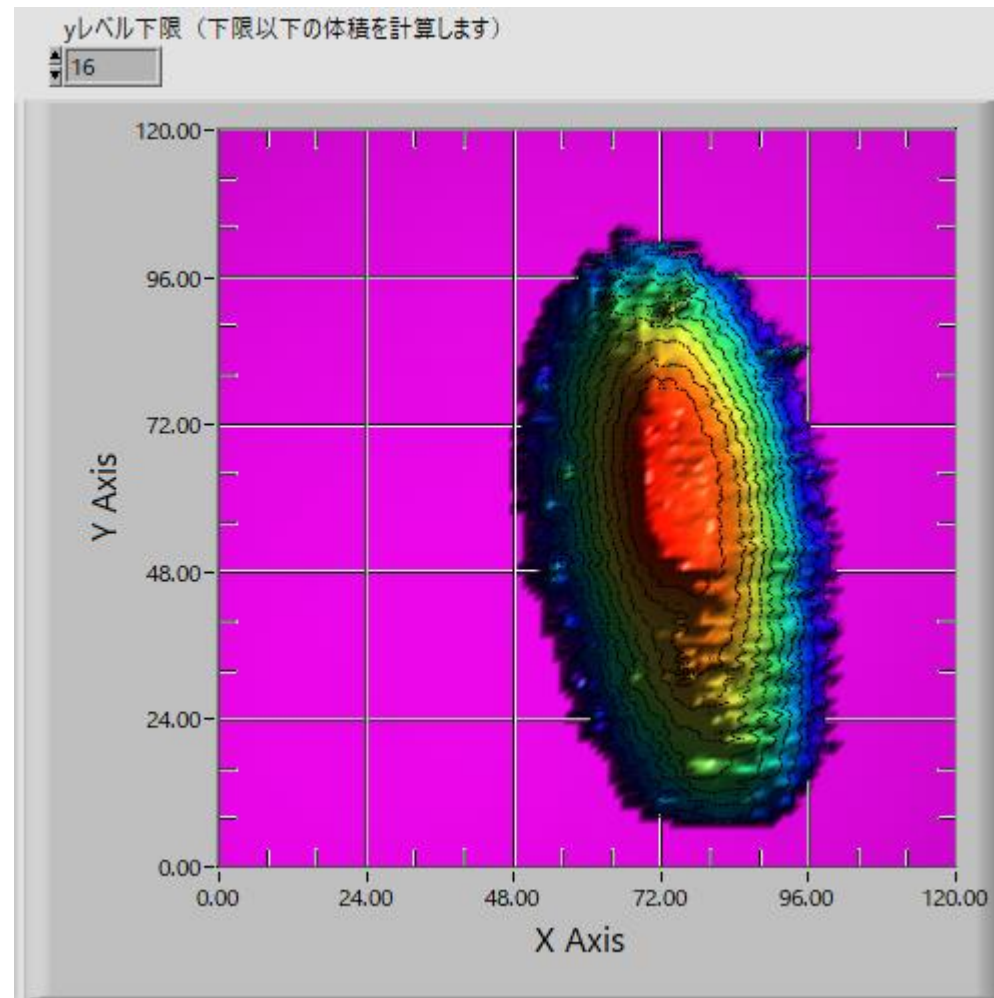
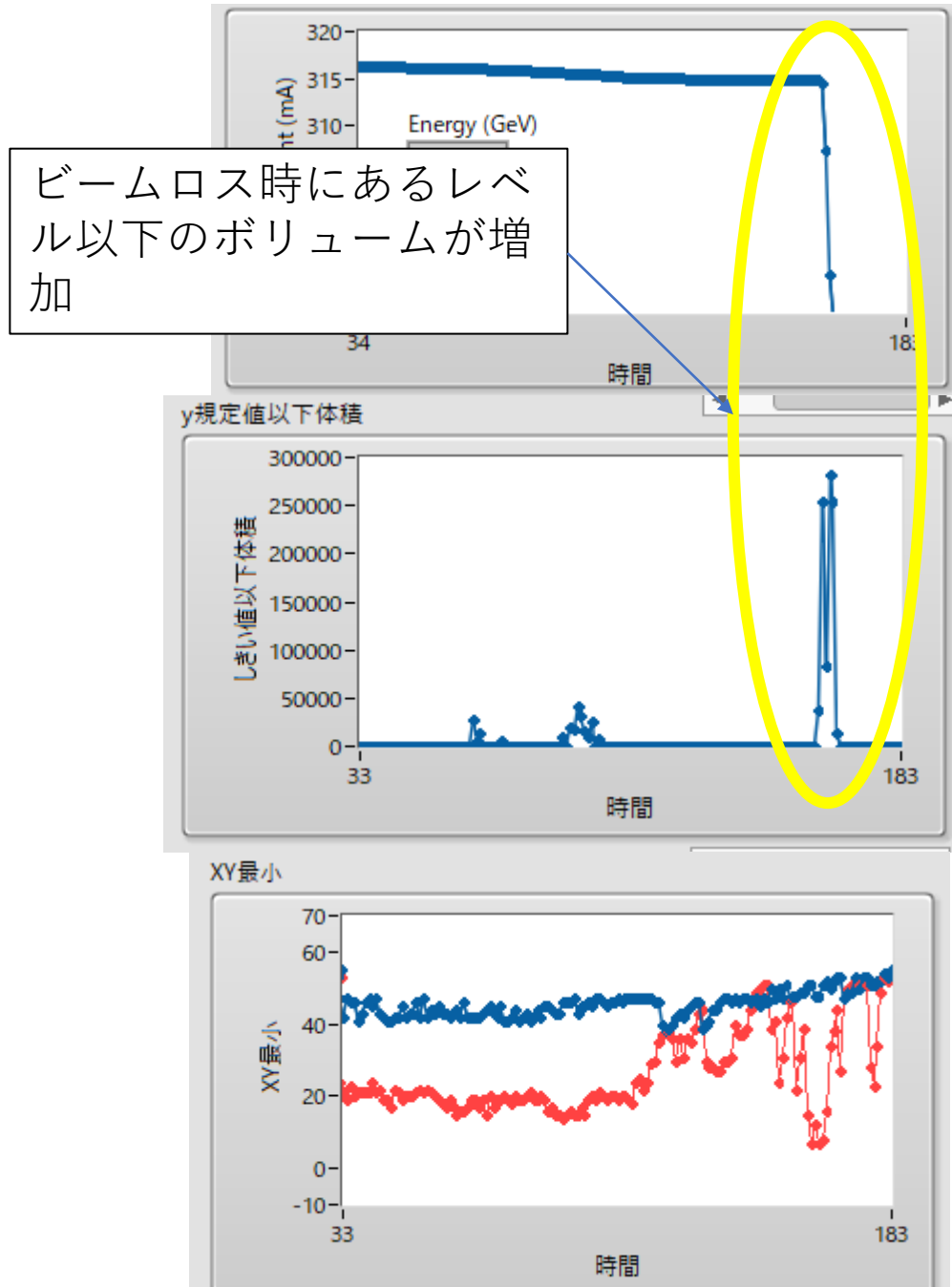
ランプアップ開始直後 (E~入射エネルギー) にビームロスが発生しない場合、特に大きな垂直方向ビーム形状の増大は見られない。

ランプアップ開始しばらくしてのビームロス (2021/3/1 50mAロス E~360 MeV)



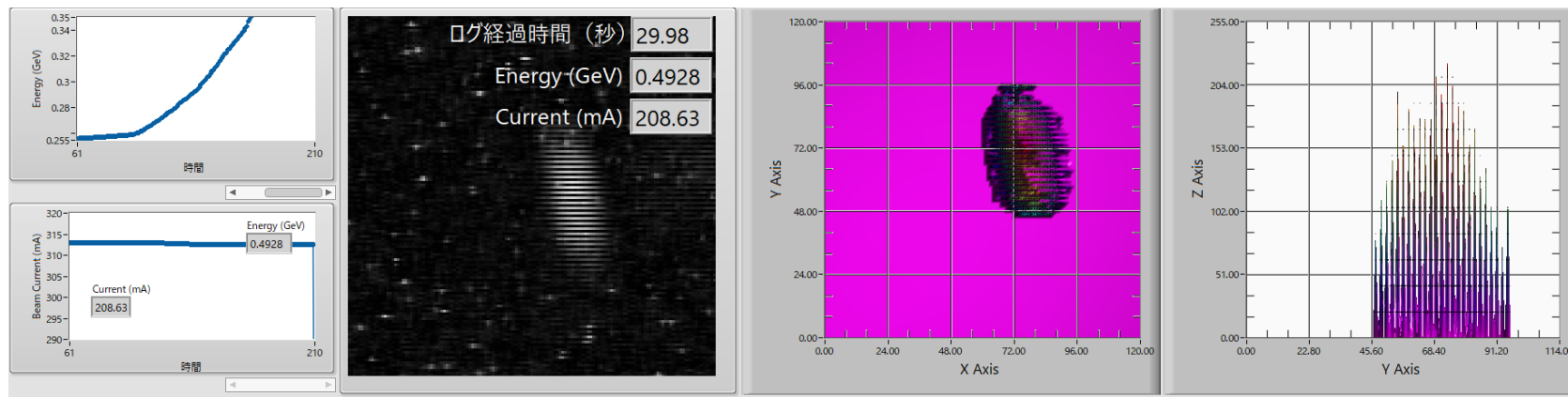
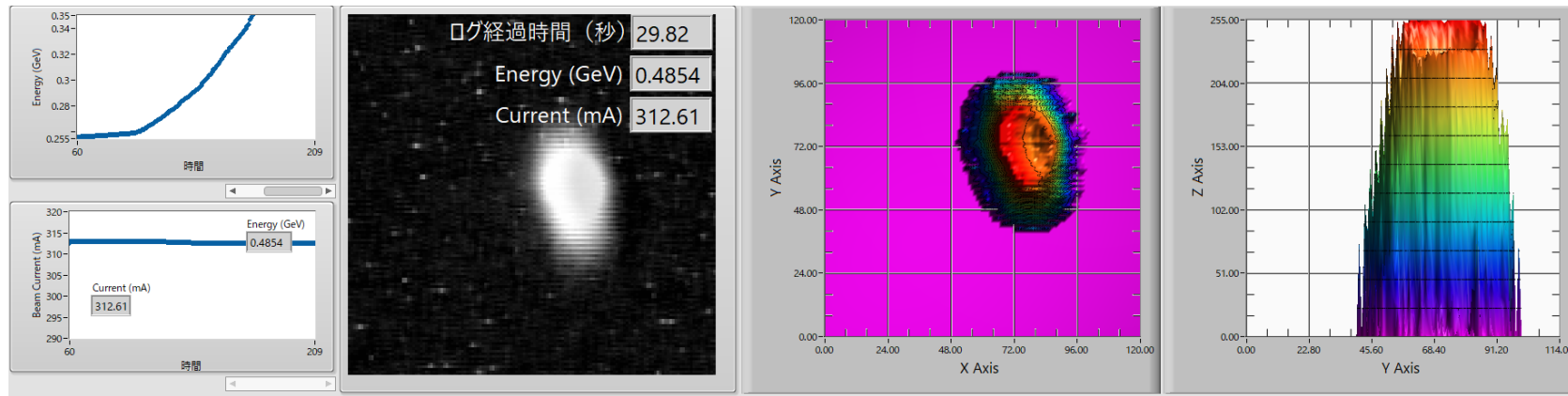
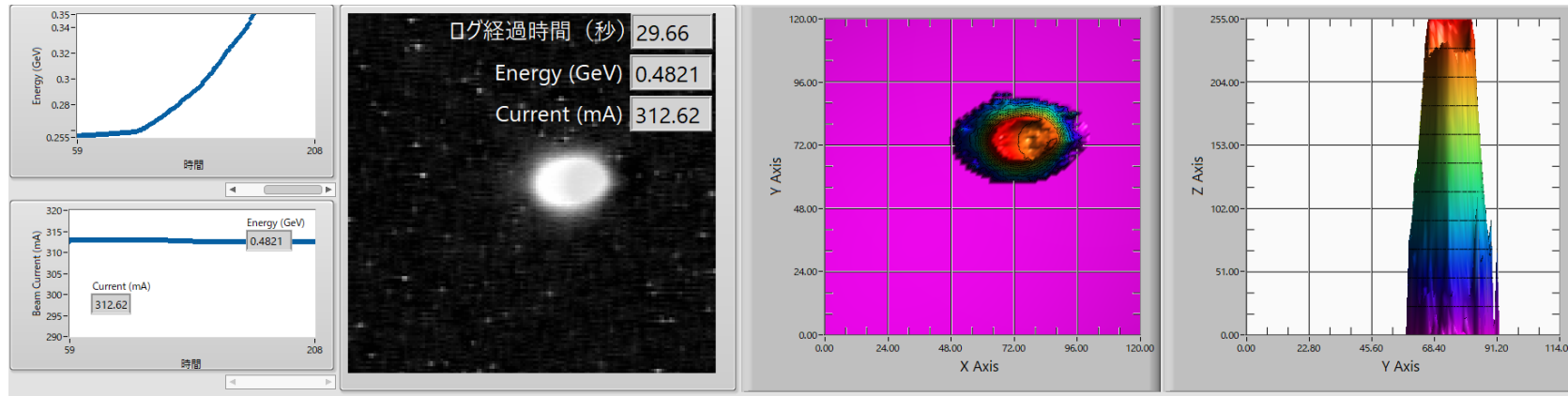
垂直方向下側への
ビームの広がり

ランプアップ開始しばらくしてのビームロス (2021/3/1 50mAロス E~360 MeV)

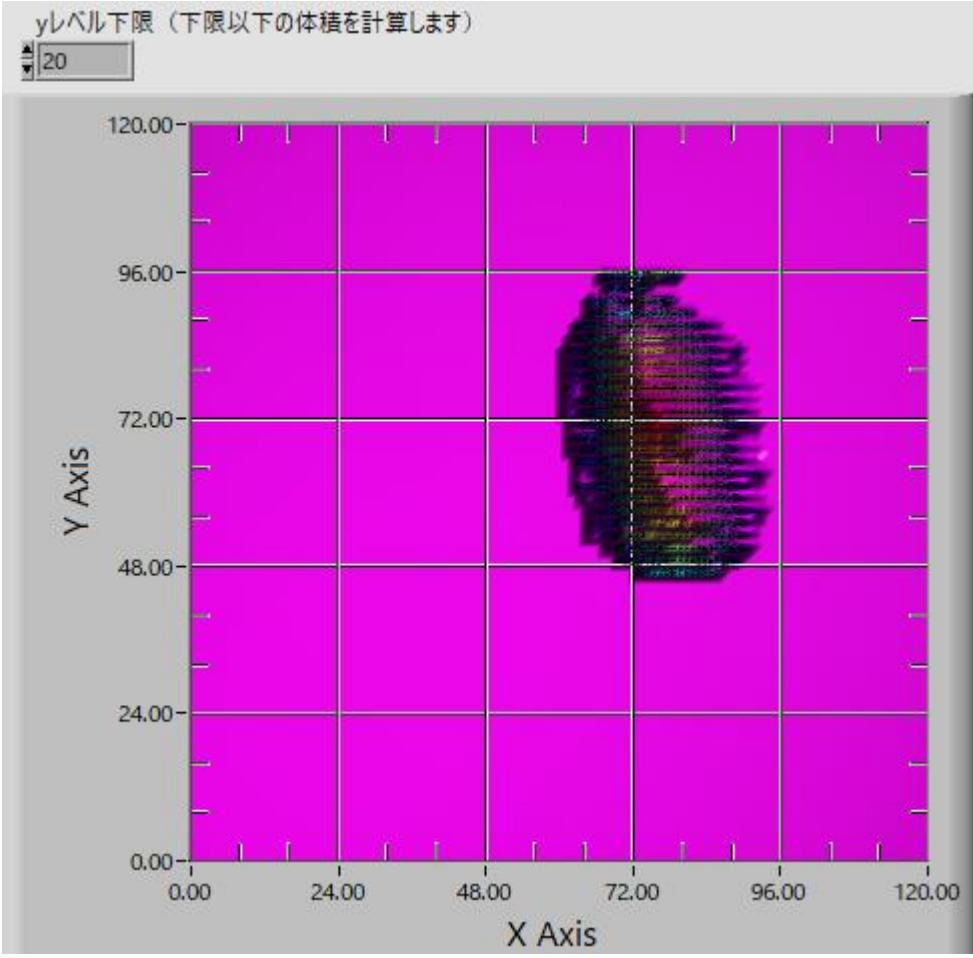
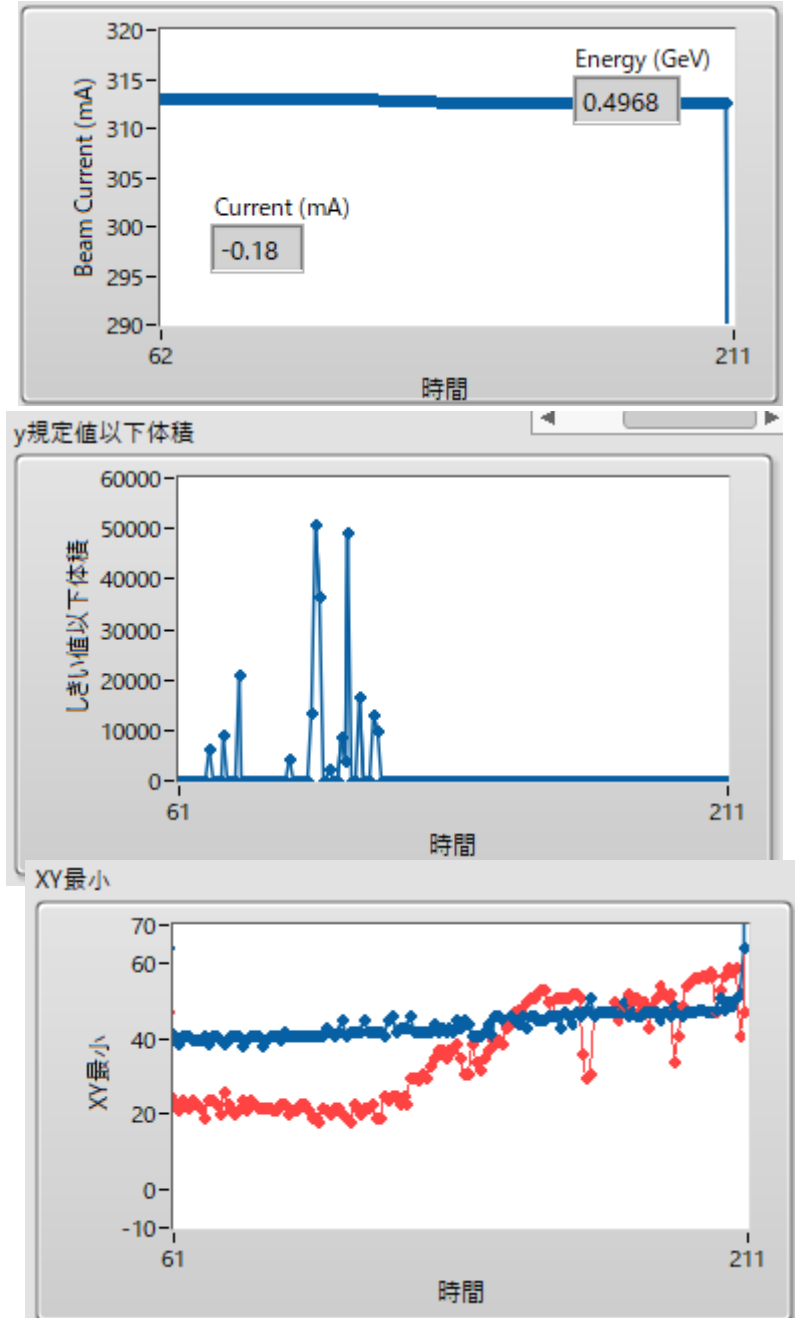


ビームロス時、垂直方向ビーム形状の広がりが明らかに確認される。

瞬間的ビームロス (2021/3/30 全ロス E~490 MeV)

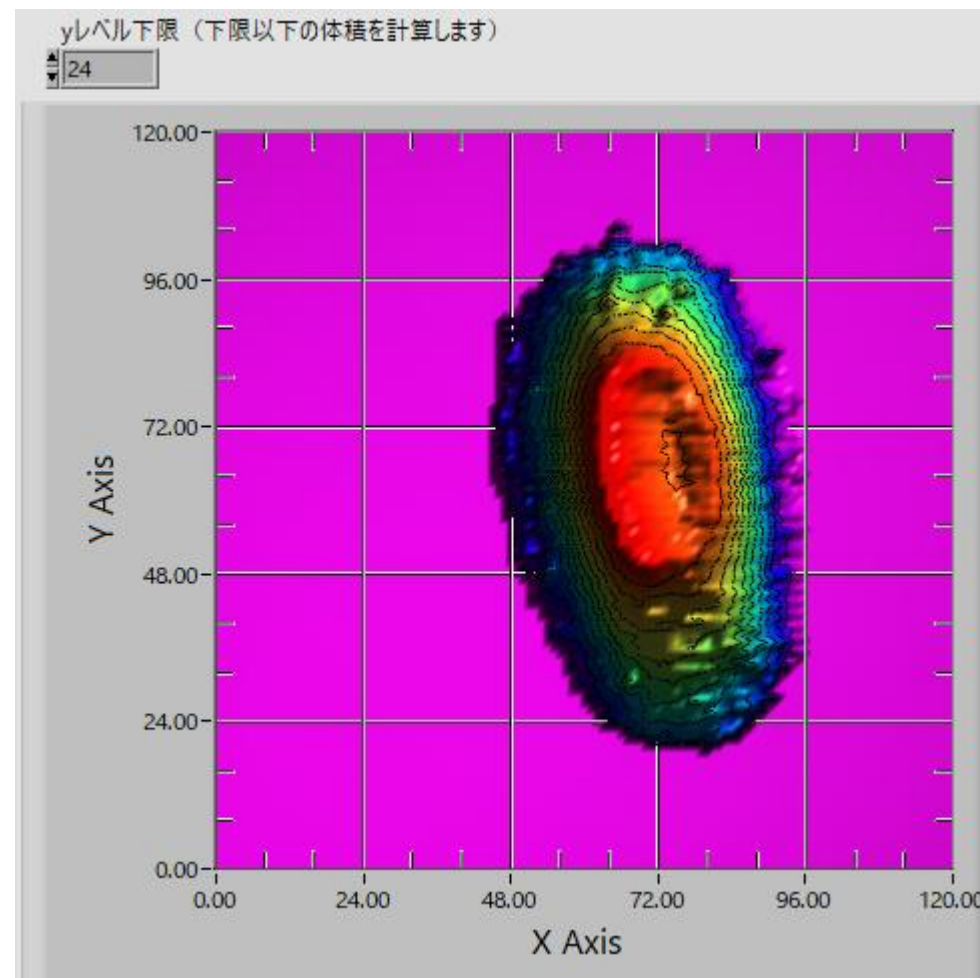
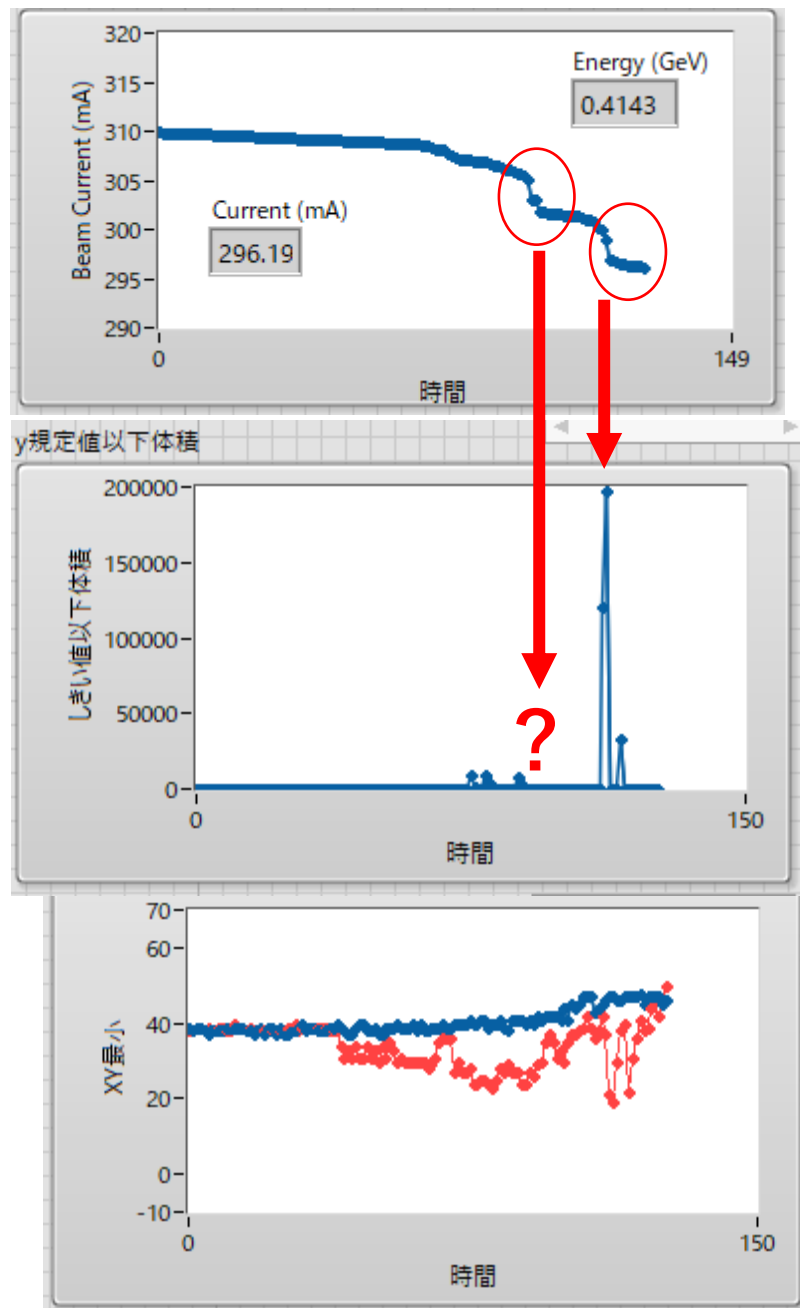


瞬間的ビームロス (2021/3/30 全ロス E~477 MeV)



0.1~0.2秒程度の中にビーム全ロス。
ビームロスする間のデータが十分に取得できていない。
画像のサンプリング速度はこの時は10Hz.
更に早いサンプリング速度が必要。

相関が不明瞭 (2021/2/16 2段階ビーム20mAロス E~340 MeV)



ビーム広がり最大になる時間とビームロスの時間が完全に一致しない。
始めのロス時に特に大きなビーム形状の変化が見られない。

想定されるビームロス要因

ある境界以上に垂直方向ビームが広がったときにビームロスが発生するように見える。

⇒アクセプタンスを超えた電子が損失する。

ビーム形状がオペレーション毎に変化する要因

- ・ チューン ⇒ 4極電源出力の再現性に問題あり？
- ・ クロマティシティー ⇒ 6極電源出力波形に問題あり？
- ・ カップリング ⇒ 入射時からE~300MeV程度までskew4極の出力なし→要因でない
- ・ ビーム位置 ⇒ 入射時からE~300MeV程度までST一定値→要因でない

その他の想定される要因

- ・ 真空度（イオントラッピング、クリアリング電極電圧）
- ・ インピーダンス
- ・ その他ビーム不安定性

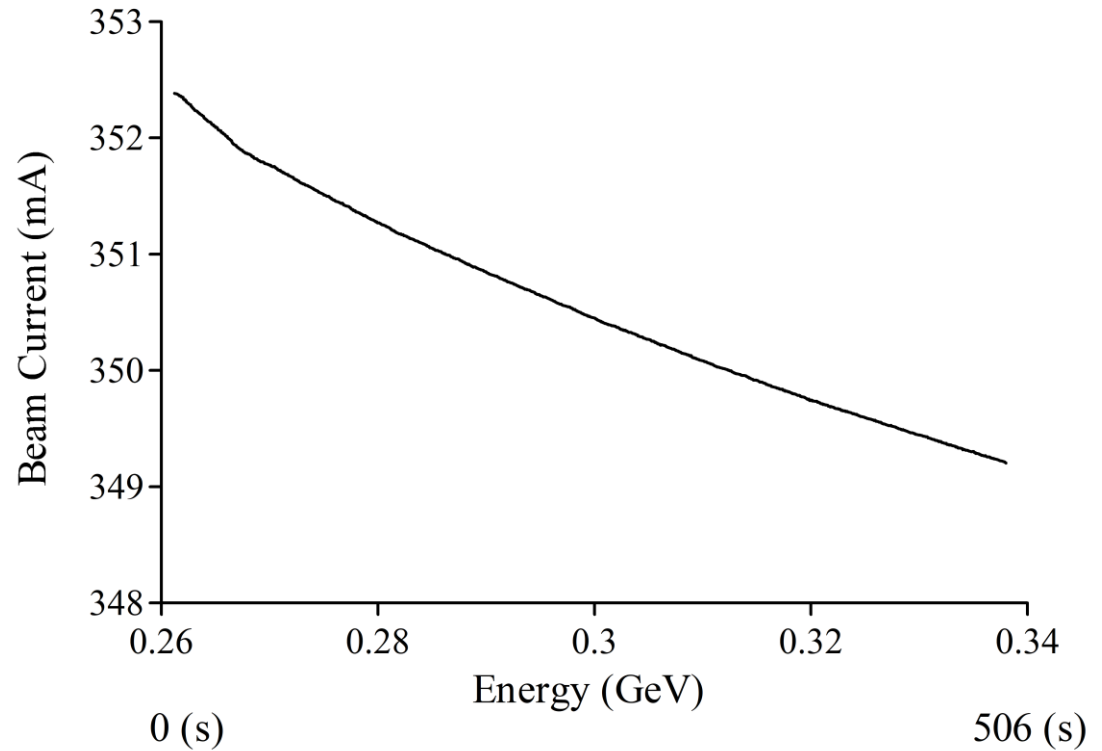
⇒可能な限り電源出力を滑らかにランプアップを行う。
まずはダイナミックな影響が無視できる状態でのテストを実施。

ダイナミックな影響を排したランプアップテスト

リモートのPCにあるLabVIEWプログラムから、1Hzにて338 MeVまでのランプアップパターン出力（通常はPLC内に保存したパターンを出力）。

- ・ 4極電磁石電源（チューン固定）励磁
- ・ 6極エネルギーに対しリニア励磁

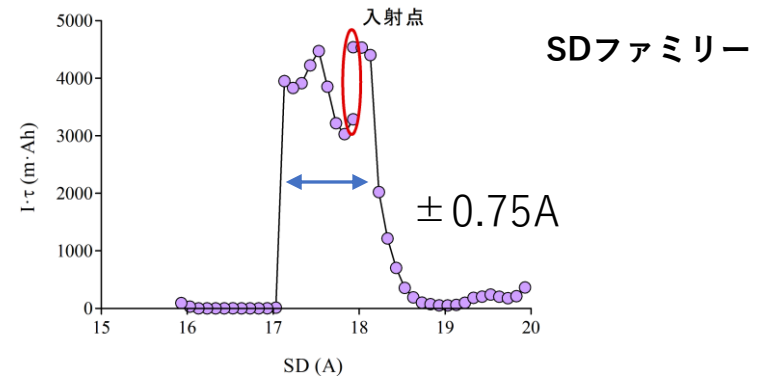
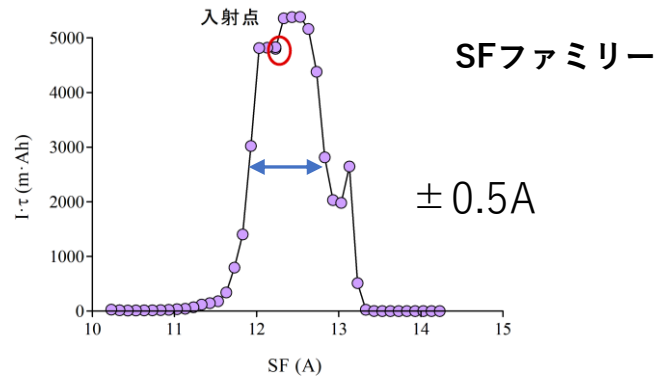
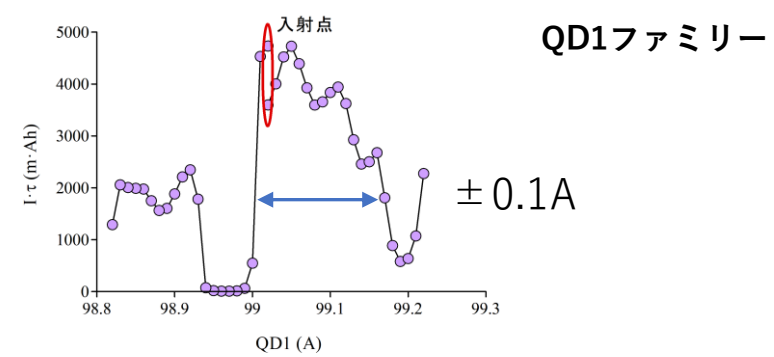
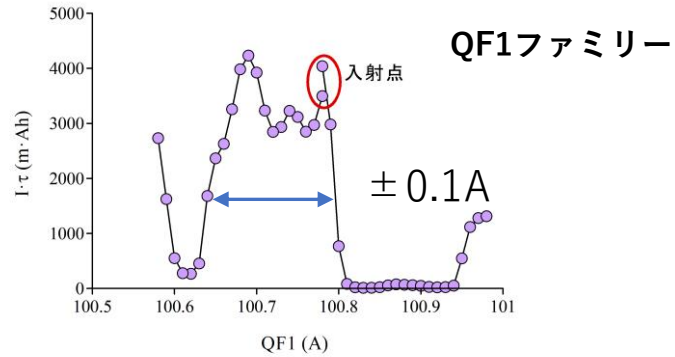
ランプアップ開始から、338 MeVに達するまでに要した時間は約506秒（8分26秒）。



ダイナミックな影響が無視できる状況においては、チューン、クロマティシティーが固定されていれば、ランプアップ直後の不連続なビームロスが発生しない。

入射点における4極および6極の安定領域

入射エネルギーでの安定領域



- ・ 4極は $I \cdot \tau$ が急落する縁に入射点がある
 - ・ 6極の安定領域は4極に比較して広い
- 入射エネルギー付近で4極： $\pm 0.1A$ 以下、

6極： $\pm 0.5A$ 以下の精度で制御しないとビームロスの要因となる。

- ・ ランプアップの際に発生する渦電流の効果は無視できない。

4極安定領域: $\Delta I/I \sim 2 \times 10^{-3}$

6極安定領域: $\Delta I/I \sim 8 \times 10^{-2}$

渦電流の効果

長方形の真空チャンバーに誘起される渦電流

$$\partial^2 B_y / \partial x^2 = 2\mu_0\sigma_c \frac{h}{g} \frac{dB_y}{dt}$$

μ_0 : 真空透磁率

σ_c : 導電率

h: 厚み

g: ギャップ

SAGA-LS偏向電磁石真空チャンバーの典型的な寸法、1分でランプアップする場合、6極成分としておおよそ

K \sim 0.123 程度の渦電流の影響がある。

偏向電磁石チャンバーにこの6極成分が発生した場合、クロマティシティーの変化は

$$\Delta \xi_x \sim 0.067, \Delta \xi_y \sim 0.512$$

これを補正するための6極強さは、 $\Delta K_{SF} \sim 0.028, \Delta K_{SD} \sim 0.353$

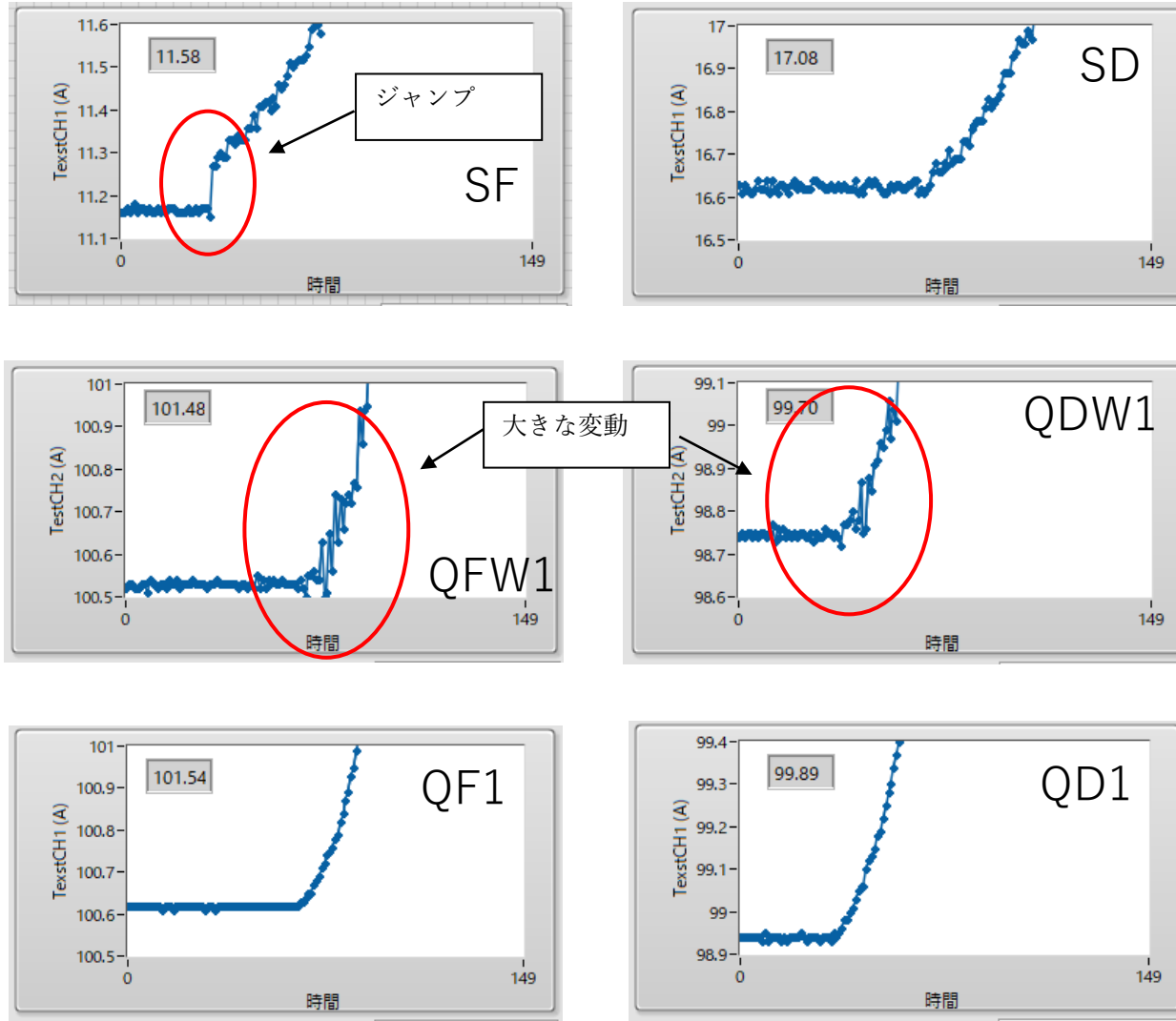
入射時の6極電磁石の強さの比としては

$$\Delta K_{SF} / K_{SF} \sim 0.003, \Delta K_{SD} / K_{SD} \sim 0.032$$

\Rightarrow 6極の安定領域に影響を与える可能性がある

(入射エネルギーでの6極電磁石の安定領域 $\Delta I / I \sim 8 \times 10^{-2}$)

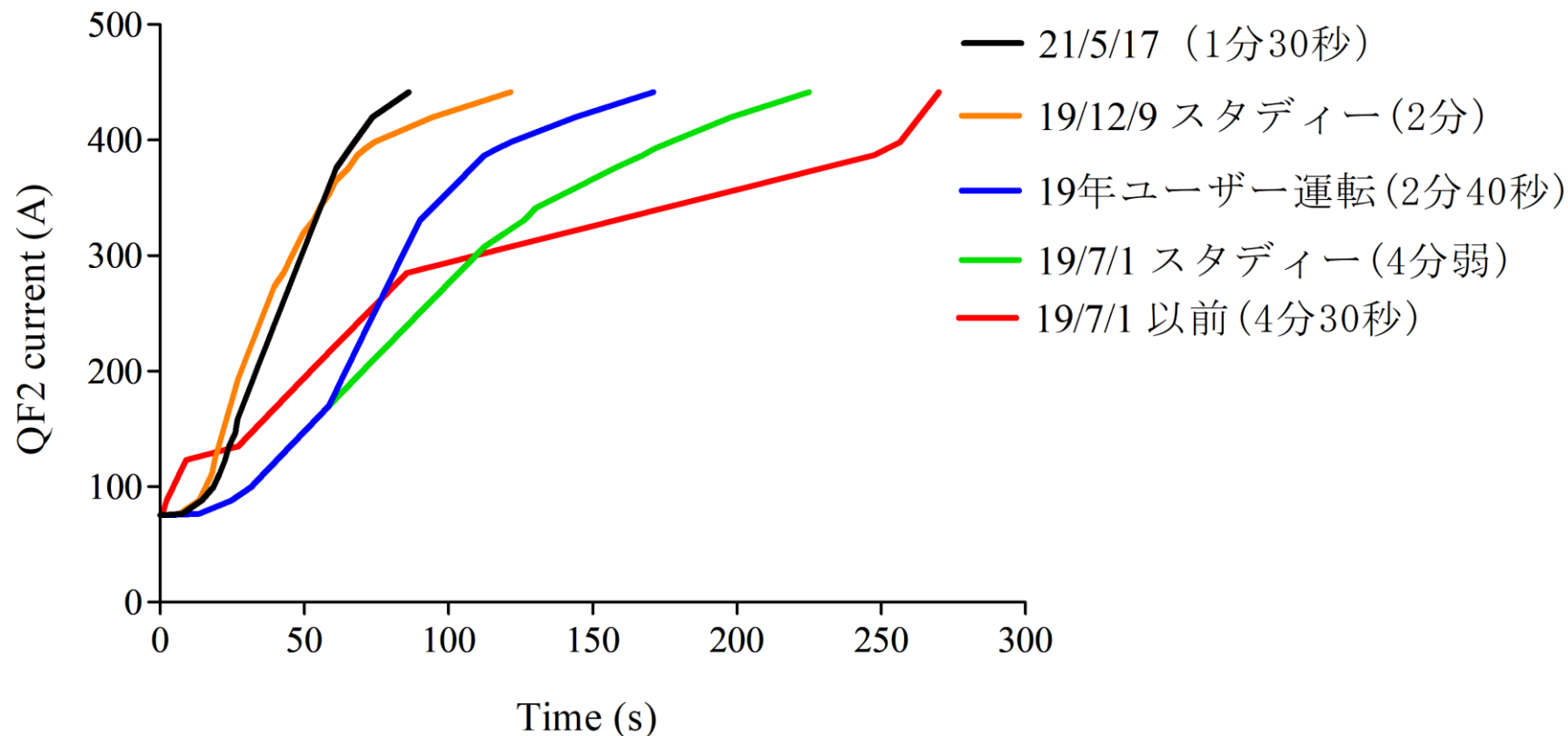
ランプアップ直後の電源出力の測定



*グラフの時間は実時間の10倍

SF電源にランプアップ直後のジャンプ（出力の跳ね）、QFW1, QDW1電源にはQF1およびQD1電源と比較して出力の大きな乱れが見られる。しかし、明確なビームロスとの相関は見られない。

ランプアップパターン調整

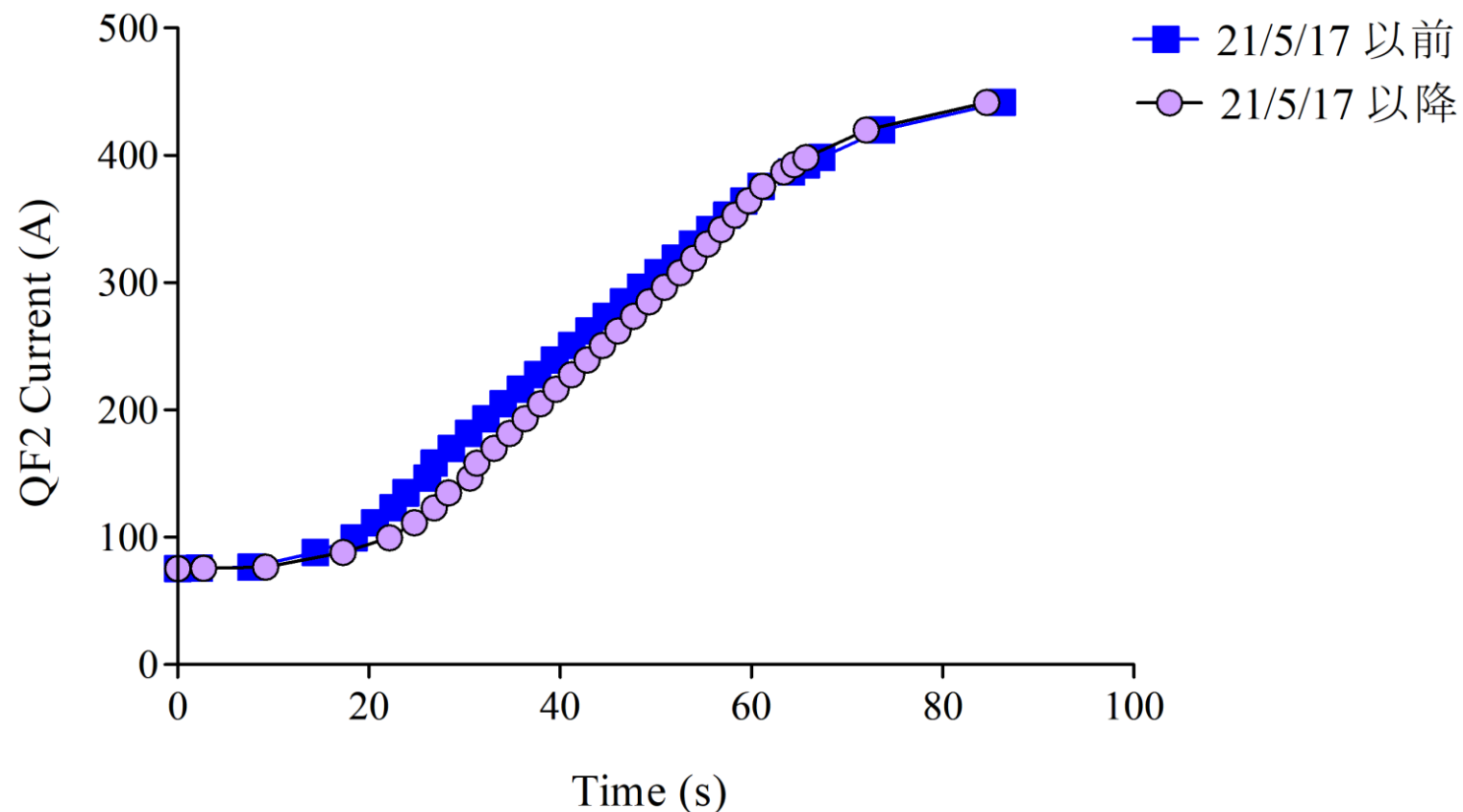


*QF2電源の出力は電子ビームエネルギーに比例。グラフの垂直方向はエネルギーの指標。

- ・コミッショニング期に試行錯誤で決定したランプアップパターンにおいてはチューンおよびクロマティシティーが保存されていなかった。
- ・マシンスタディーにより、チューンおよびクロマティシティーが固定されるようにランプアップパターンを調整。
- ・1.4 GeV到達までの所要時間を短縮。
- ・しかし、20 mA程度のランプアップ直後のビームロスの発生は完全には抑制できなかった。

ランプアップパターン微調整

ランプアップ開始時電源出力の安定化



*QF2電源の出力は電子ビームエネルギーに比例。グラフの垂直方向はエネルギーの指標。

ランプアップ開始時のリング主要電源の出力増加をビームロスが発生しない程度に低速化。エネルギーが高い領域では可能な限り高速化。1.4 GeV付近は熱負荷および空洞パワーの増加を考慮して低速化。

⇒ $E < 0.4$ GeV以下での不連続なビームロスはほぼ解決された。

まとめ

- ランプアップ開始直後 ($E < 0.4$ GeV) に発生するビームロス要因を特定するために、PXIシステムによるビームプロファイルとビーム位置、電磁石電源、ビーム電流の同時観測システムを構築した。
- ビームロス時に垂直方向ビームサイズ増大が見られた。
- 入射エネルギーにおける安定領域は狭く、その領域内に収まるように滑らかなランプアップパターンを構築。
- ビームロスはほぼ解消された。
- 1.4 GeV到達までの時間を4分半から1分半に短縮した。
- PXIシステムによる画像とデータの同時高速観測システムは有用。他の事例にも応用できる。



今後の予定

- 必ずしも垂直方向ビームサイズとビームロスの関係が明確ではないケースがある。
- 長手方向の運動観測
(シンクロトン振動、バンチ長など)
- ビームロスのひとつの要因は垂直方向の空間的なアクセプタンスを超えた電子の損失と考えられる。
- 入射時における安定領域が狭い理由はビームのブローアップであろう。
- 入射時におけるビームのブローアップを抑制することで、現在最大で400 mA程度の蓄積ビーム電流を増加させることが可能かもしれない。

ご視聴ありがとうございました。