

# Compact-ERL DC電子銃の 500 kV長期安定運転

山本将博<sup>A)</sup>、西森信行<sup>B)</sup>、宮島司<sup>A)</sup>、本田洋介<sup>A)</sup>、羽島良一<sup>B)</sup>

A) 高エネルギー加速器研究機構(KEK)

B) 量子科学技術研究開発機構(QST)

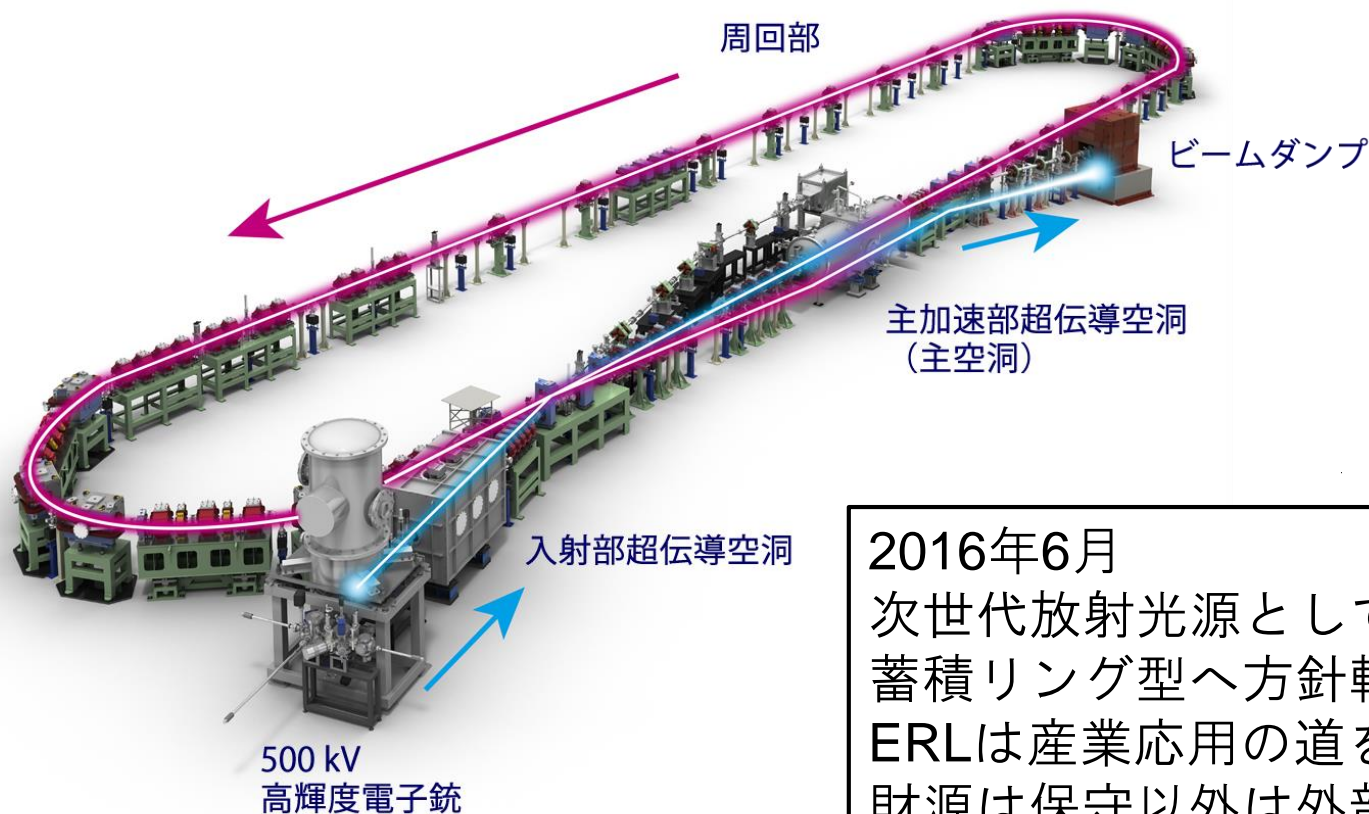
# Outline

1. **Compact-ERL(cERL)のこれまでと方針変更について**
2. **500 kV安定運転までの道のり**
  - ・追加コンディショニングの結果と安定運転へのヒント
  - ・カソードからの暗電流問題
  - ・入射器空洞の電界放出由来の問題
3. **500 kV安定運転**
  - ・1 mA相当のCWビーム生成試験とカソードQE評価
4. **高電圧安定保持の背景**
5. **まとめ**
6. **謝辞**

## cERLのこれまでと方針変更について

コミッショニング開始  
 Apr. 2013 :Injector section  
 Dec. 2013 :Recirculation

Mar. 2016:  
 900 uA CW beamエネルギー回収運転を実証。  
 (最大バンチ電荷量:  $\sim 5.5$  pC@162.5MHz)



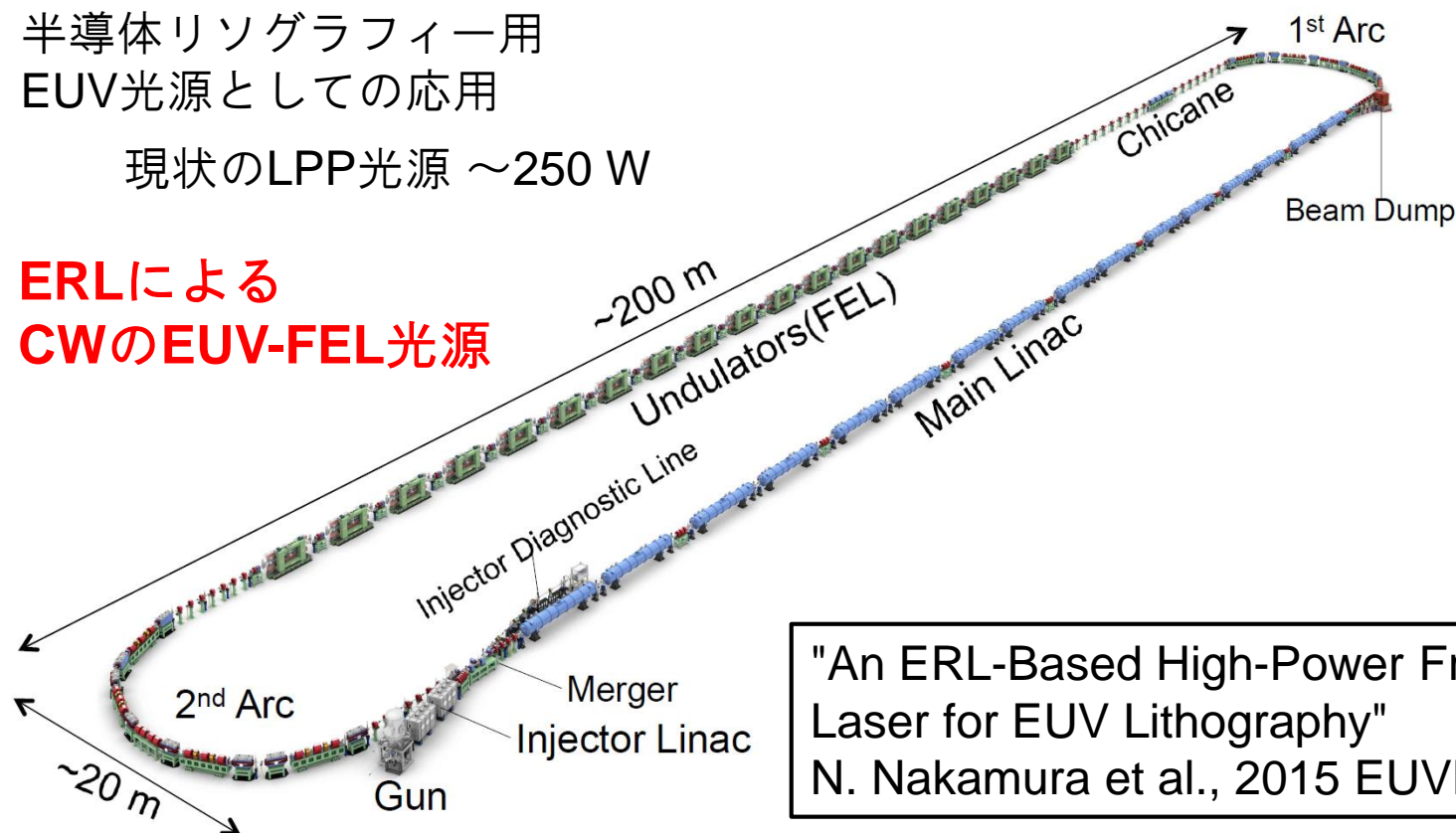
2016年6月  
 次世代放射光源としてERL方式から蓄積リング型へ方針転換。  
 ERLは産業応用の道を探ることに。  
 財源は保守以外は外部資金。

## cERLのこれまでと方針変更について

半導体リソグラフィー用  
EUV光源としての応用

現状のLPP光源  $\sim 250$  W

**ERLによる  
CWのEUV-FEL光源**



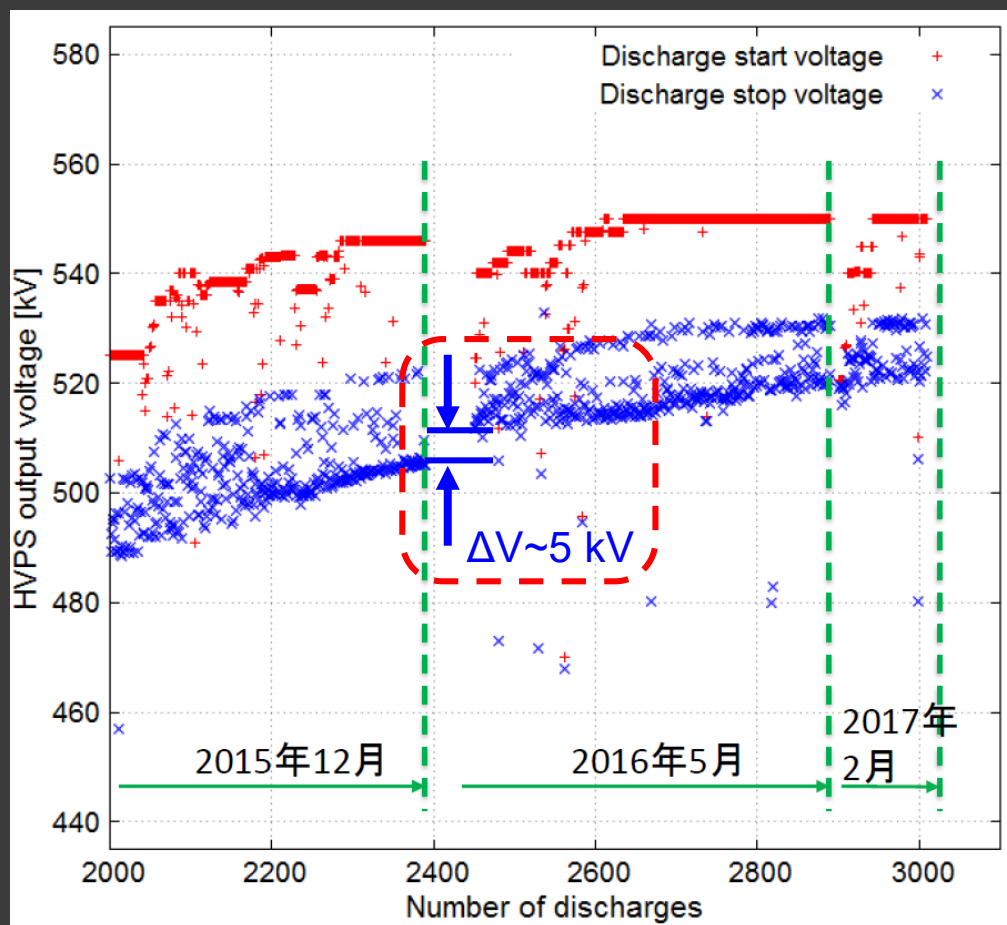
"An ERL-Based High-Power Free-Electron Laser for EUV Lithography"  
N. Nakamura et al., 2015 EUVL Workshop

Target : 波長13.5nm, **FEL光強度 >10 kW (CW)**  
電子ビームエネルギー : 800 MeV, 電荷量:60 pC,  
平均電流:9.75 mA (繰り返し:162.5 MHz)

**電子銃への高輝度・大電流ビームの安定供給の要請は変わらない。**

# 500 kV安定運転までの道のり

## 追加コンディショニングの結果と安定運転へのヒント



2015年12月以降、2度の追加コンディショニングを実施。

2016年3月にcERL運転を実施。

- ・ 電子銃加速電圧は主に390 kV。
- ・ 運転中に放電無し。

2016年5月のコンディショニング

- ・ 初期段階で放電停止電圧が約5 kV上昇。
- ・ 放電停止電圧約520 kVまで実施。

2017年2月のコンディショニング

- ・ 前回のコンディショニングの履歴をそのまま継承。
- ・ この間のcERL運転は無し。

2016年5月時にすでに放電停止電圧が上昇していた原因は3月のcERL運転が影響か。

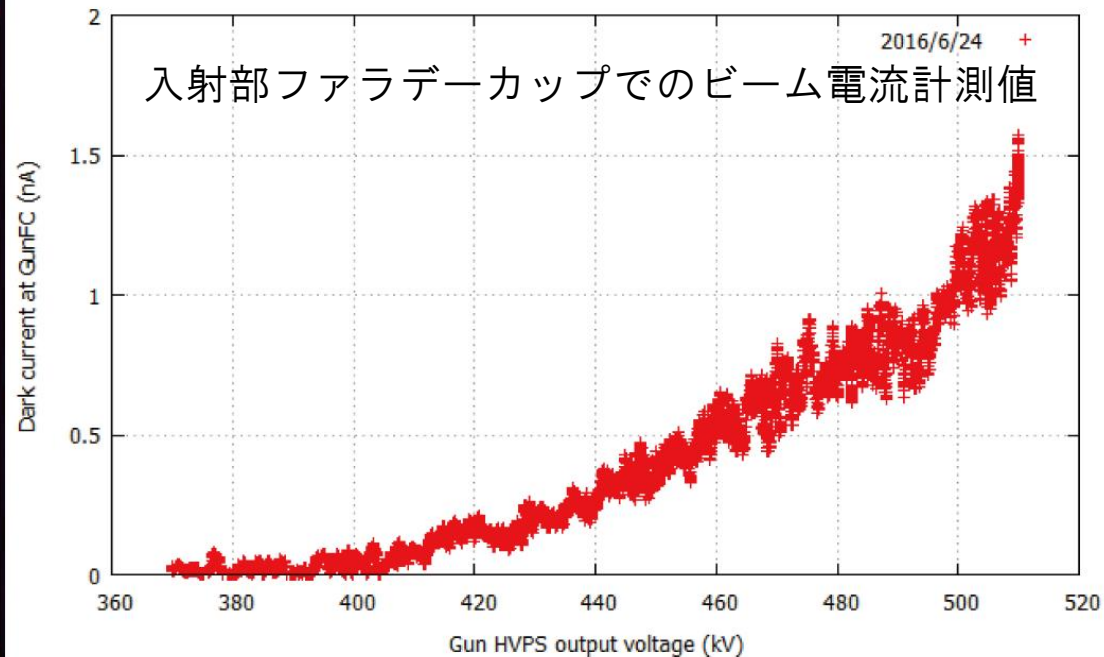
長期安定運転が可能となる重要な手がかかり

# 500 kV安定運転までの道のり

## カソードからの暗電流問題

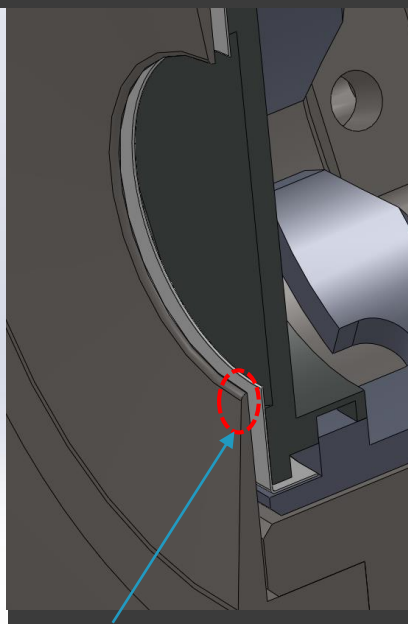
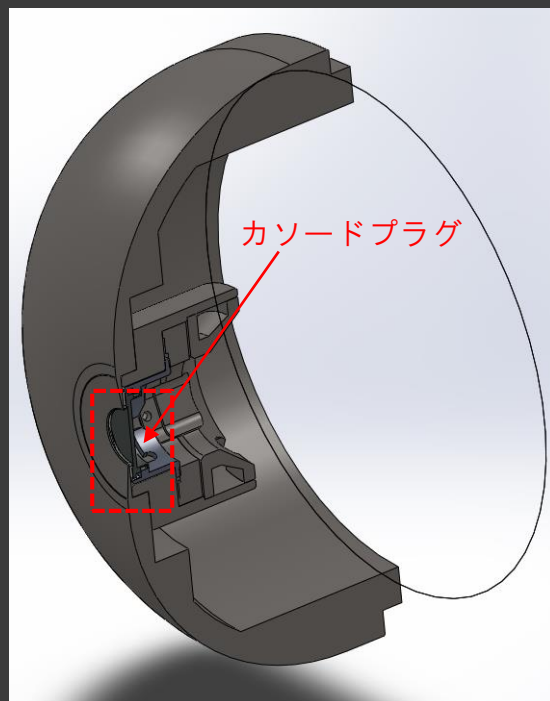
電源電圧510kV  
積分時間100ms,  
gain 10

電子銃出口のscreenでの  
暗電流ビーム像



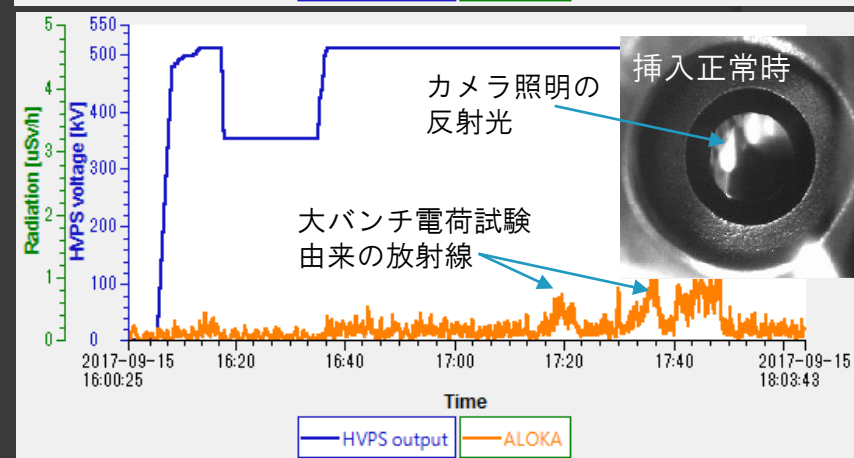
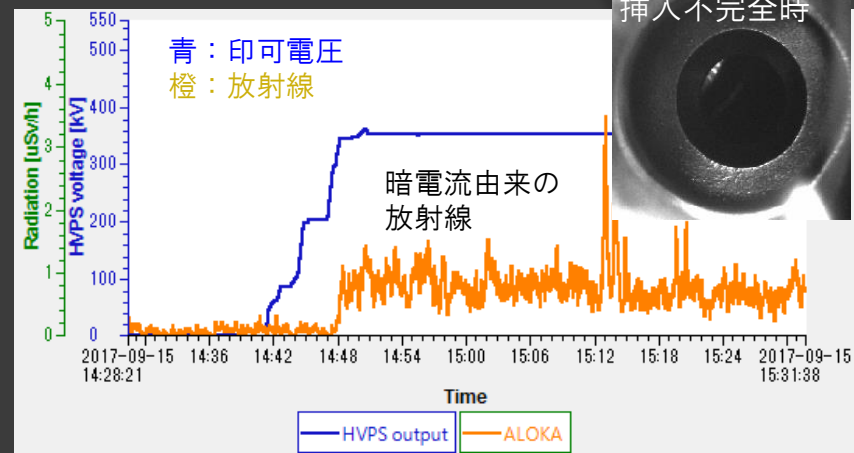
- ・ ダミーカソードプラグでは500 kV印可は問題無く、暗電流も無い。
- ・ 光陰極付きのカソードプラグ挿入で暗電流が発生。
- ・ 加速電圧400 kV付近以上でビームとして輸送される暗電流を確認。
- ・ 場合によってはより低い電圧から発生し、放電が発生する事象あり。

# 500 kV安定運転までの道のり



電極穴およびカソードキャップのエッジ

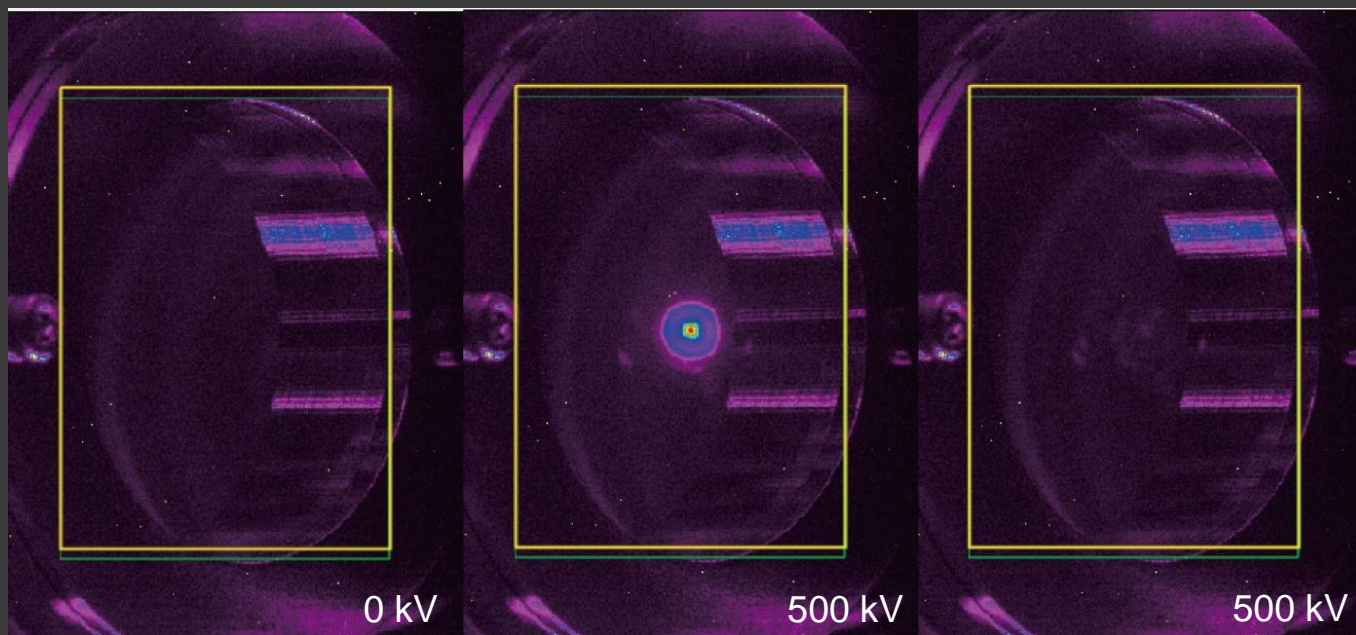
プラグの寸法誤差0.1 mmの違いで嵌め合い具合が大きく異なる。



カソードプラグが奥まできれいに装着した状態で500kV印可OK。  
不完全な差込み状態の場合、電極穴のエッジに電界集中発生。  
カソードプラグおよびその周囲の寸法を厳しくコントロールすることが不可欠。

# 500 kV安定運転までの道のり

## カソード暗電流問題処置後の状況



Background

真空計迷光のカソード  
励起によるビーム

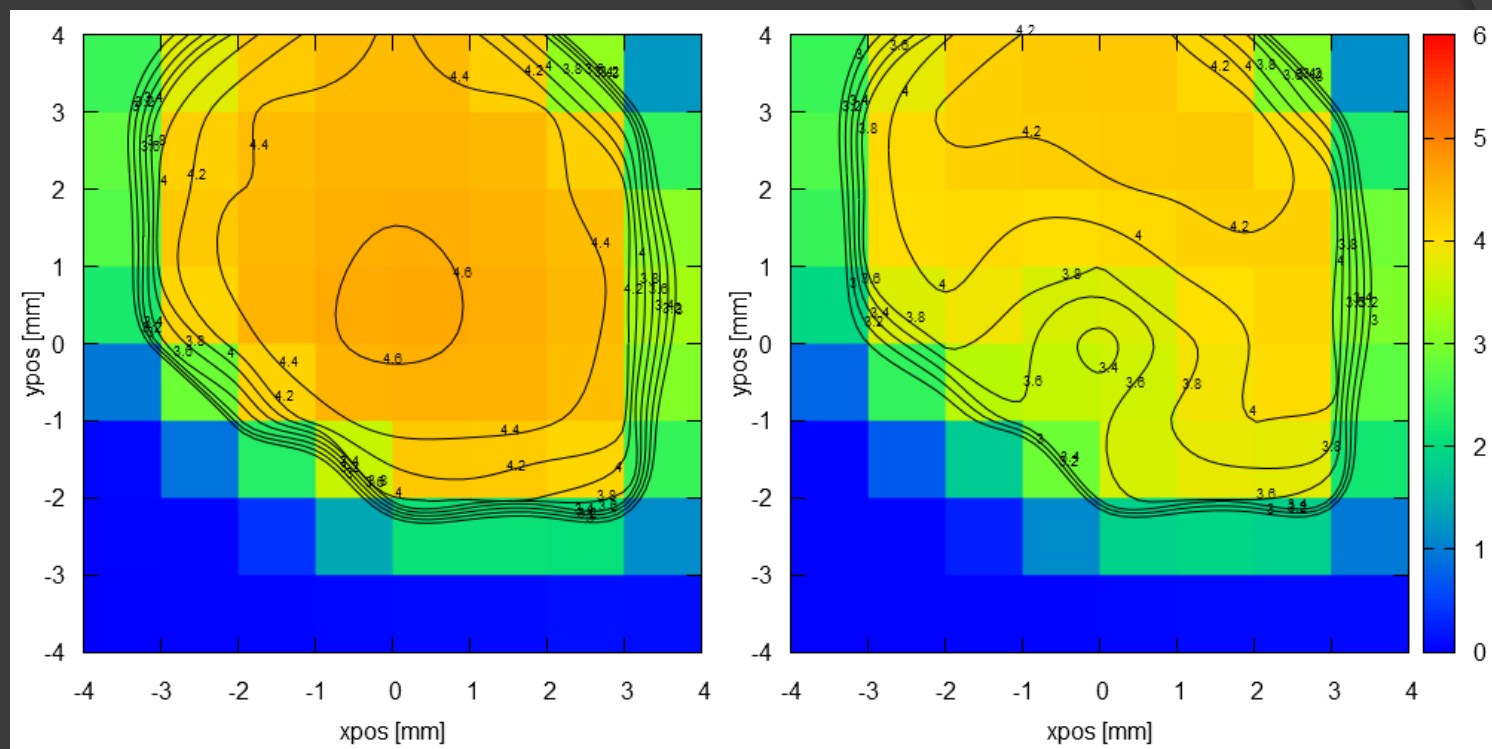
電界放出由来のビーム

- ・ スクリーンモニターを利用した微小電流ビームの検出。
- ・ ファラデーカップで通常ビーム電流値と発光量の相関を評価。
- ・ 真空計迷光による暗電流ビームはおよそ100 pA相当（QEに依存）。
- ・ 電界放出由来のビームはおよそ5 pA相当。



# 500 kV安定運転までの道のり

## スクリーンモニターのチャージアップ問題



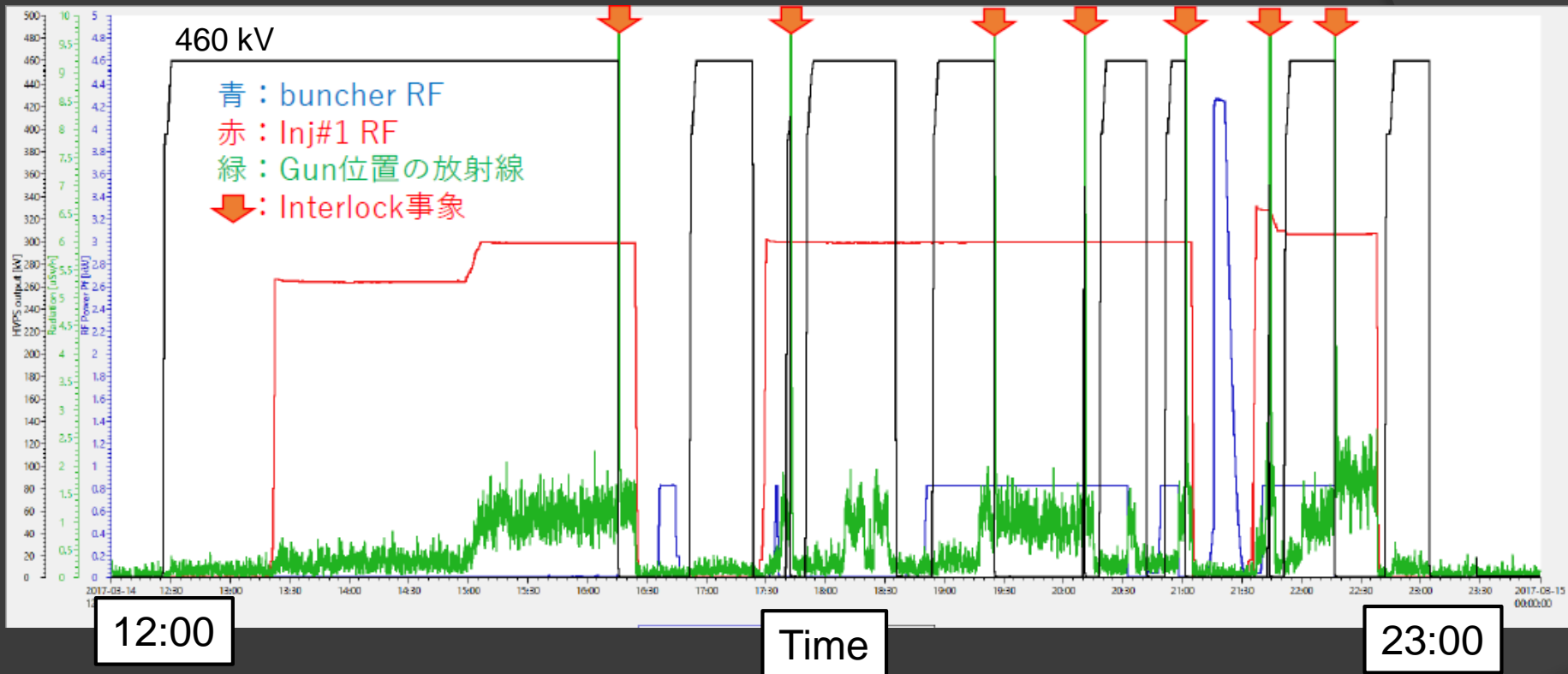
大電荷のバンチビーム試験中に電子銃近傍のスクリーンモニターでチャージアップ放電が発生する問題が多発。

放電発生後に再生困難なカソードQE低下を確認。

バーストパルス幅を100 nsに抑え発生頻度を低く抑制。

# 500 kV安定運転までの道のり

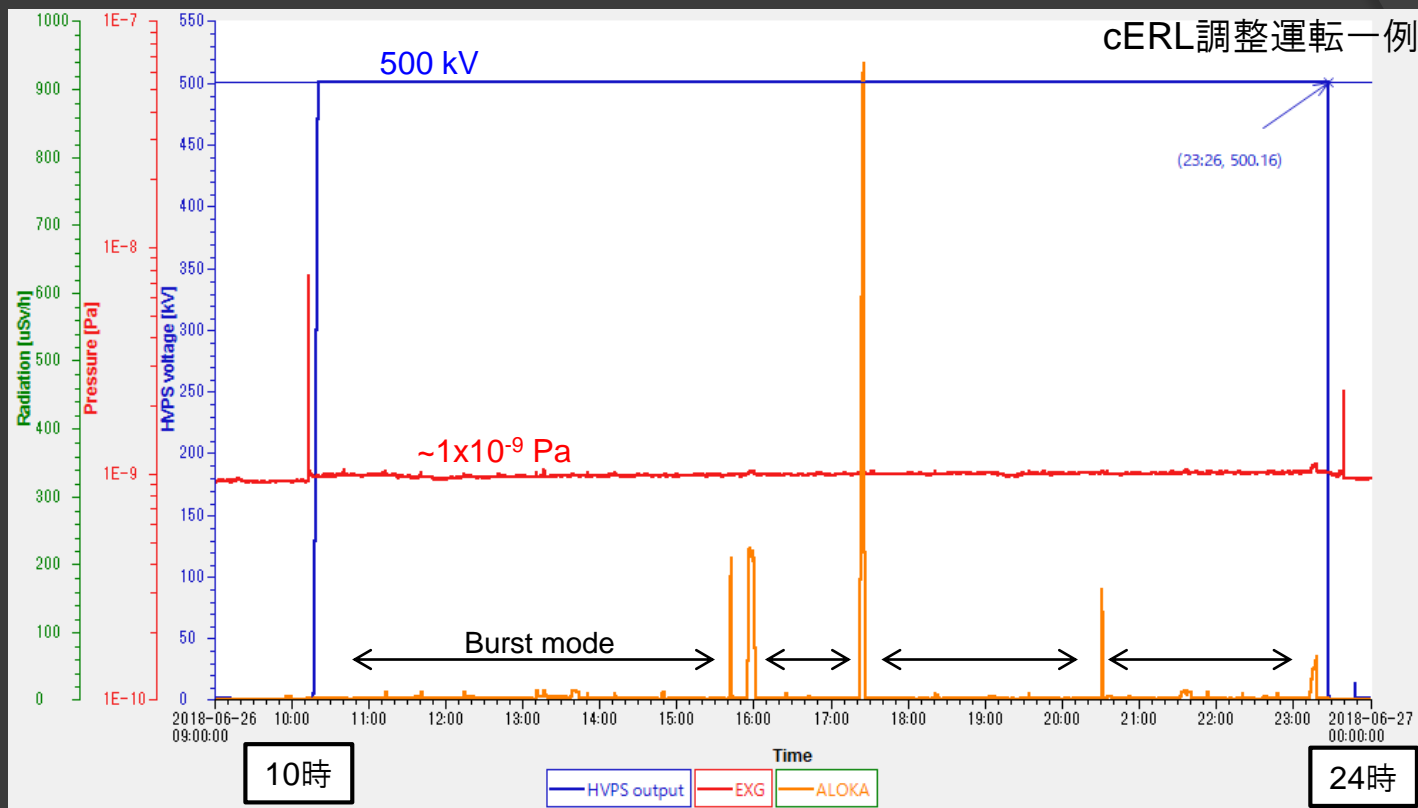
## 入射器空洞の電界放出由来の問題



- ・ 電子銃から一瞬多量のビームが発生し、入射器空洞下流部で損失。放射線のインターロック作動で電子銃HV停止。
- ・ 入射器空洞からの電界放出が電子銃の放射線モニターで検出されるときに電子銃が高電圧状態で問題が発生。

入射器空洞の電界放出を抑えた運転で解消。

# 500 kV安定運転



## 加速電圧 500 kV運転時間

電子銃単独運転（2017年6月～）： 20 時間

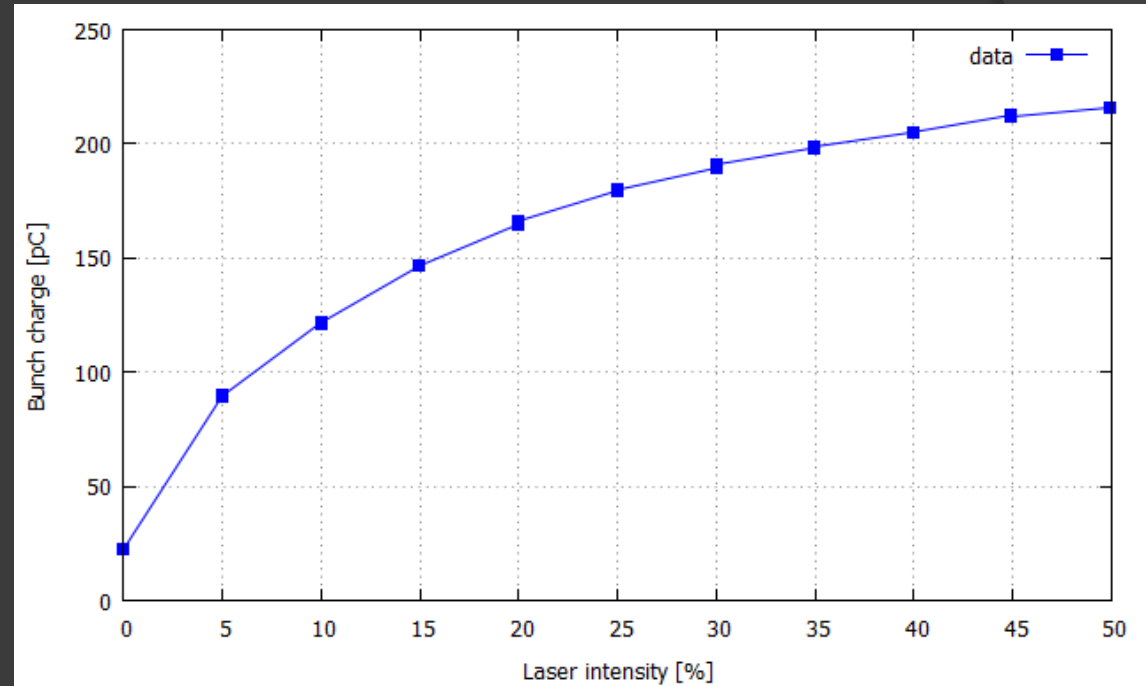
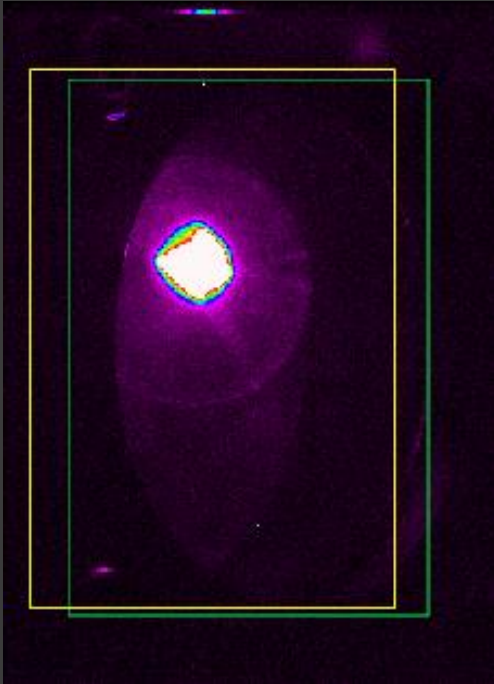
2018年3月運転： 133 時間

2018年6月運転： 216 時間

累計 369時間 放電は一切無し

# 500 kV安定運転

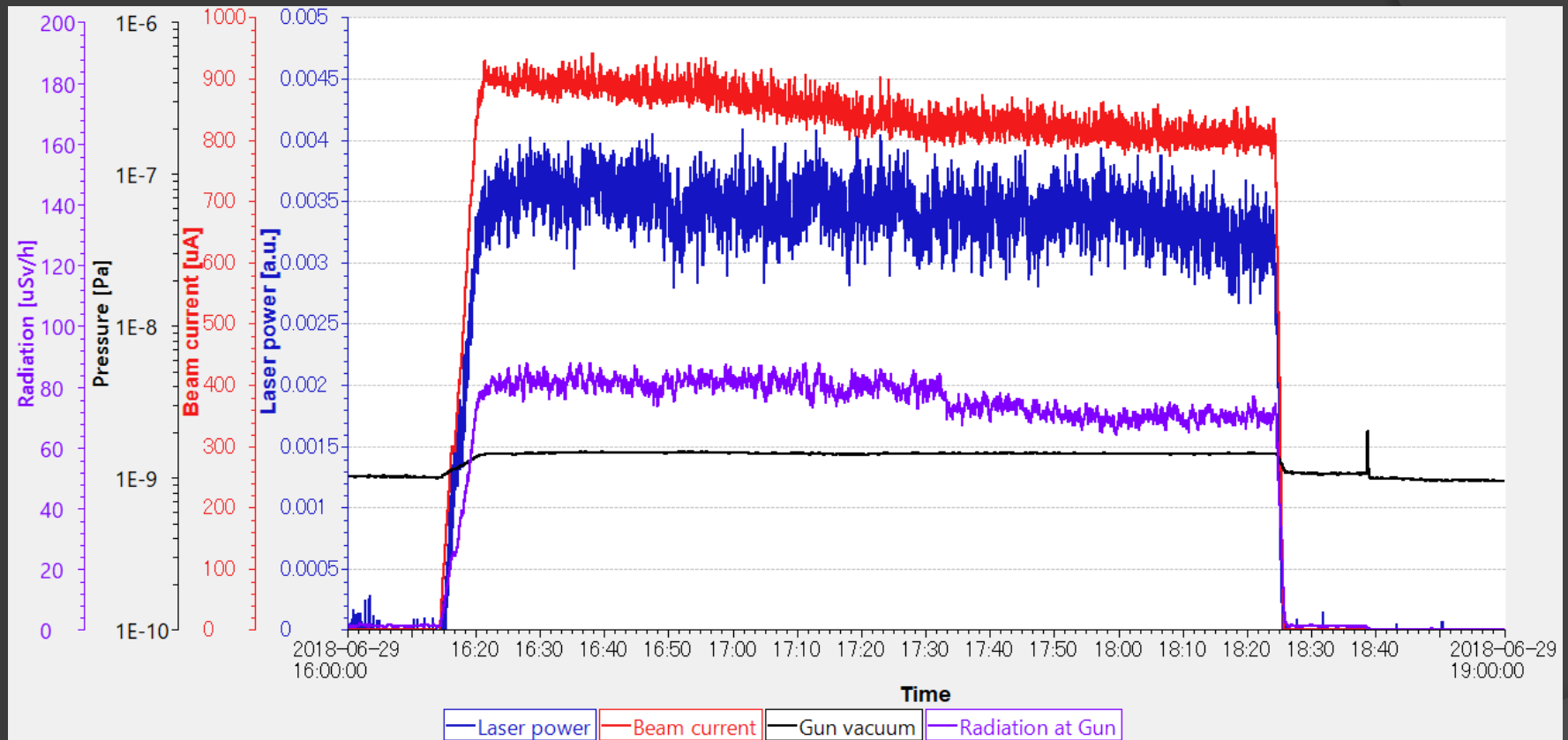
## Burstモード運転での大電荷バンチ生成試験



- ・ カソード照射径： $\phi 2$  mm
- ・ Laser繰返し：1.3 GHz, パルス幅 32 ps, マクロパルス幅：100 ns
- ・ バンチあたり200 pC（1.3 GHz CW 260 mA相当）を超える出力確認。
- ・ ファラデーカップ到達前に損失
- ・ 空間電荷制限および表面電荷制限

# 500 kV安定運転

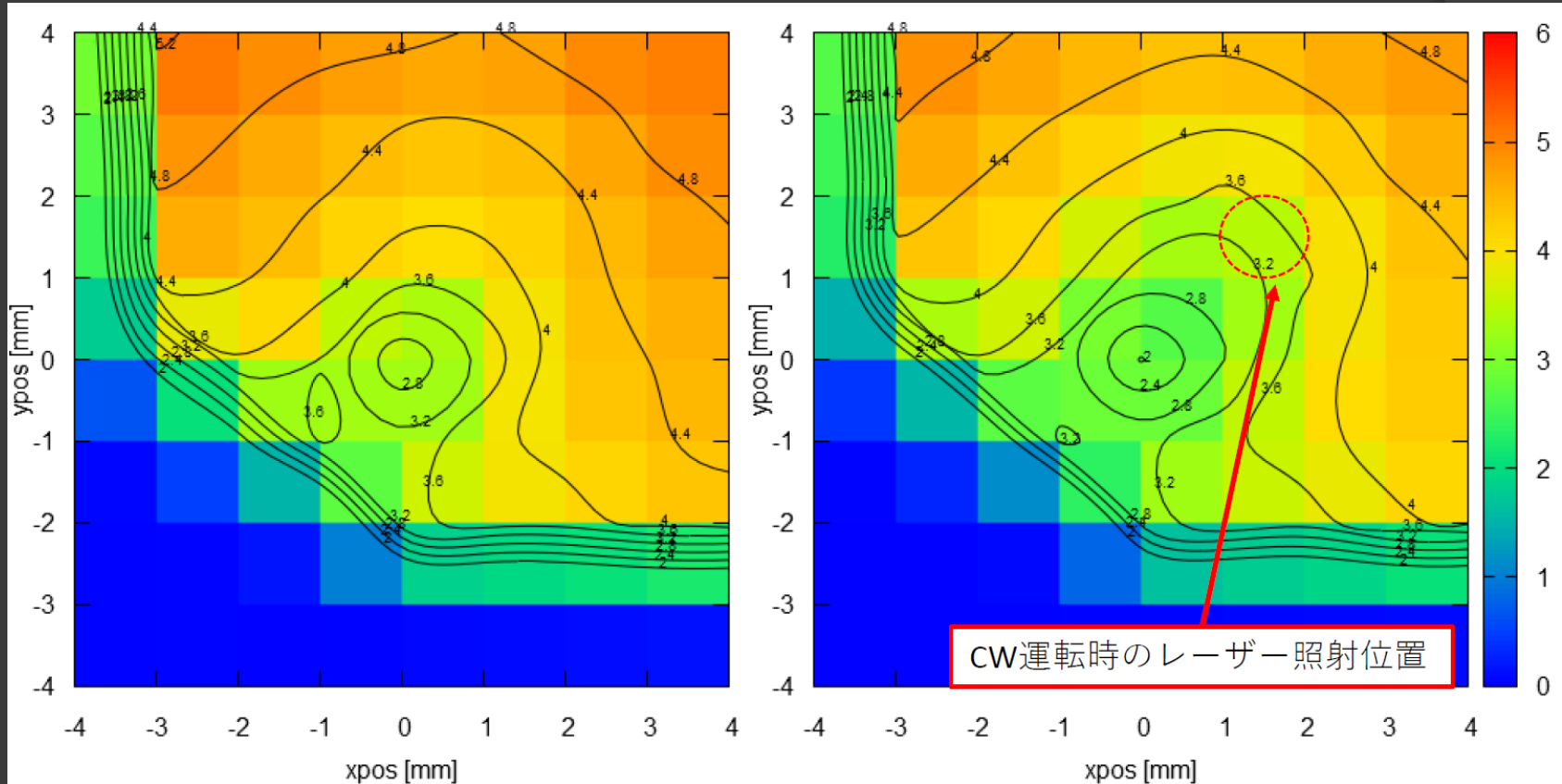
## 1 mA相当のCWビーム生成試験



- ・ 6月運転最終日に数時間の大電流CW運転保持の試験を実施。
- ・ 電子銃加速電圧 500 kV, ビーム電流値：800～900  $\mu\text{A}$
- ・ 約2時間のCW運転。トリップなどは無し。
- ・ QE低下による電流値変化を観測。

# 500 kV安定運転

## 1 mA相当のCWビーム生成試験前後のカソードQE

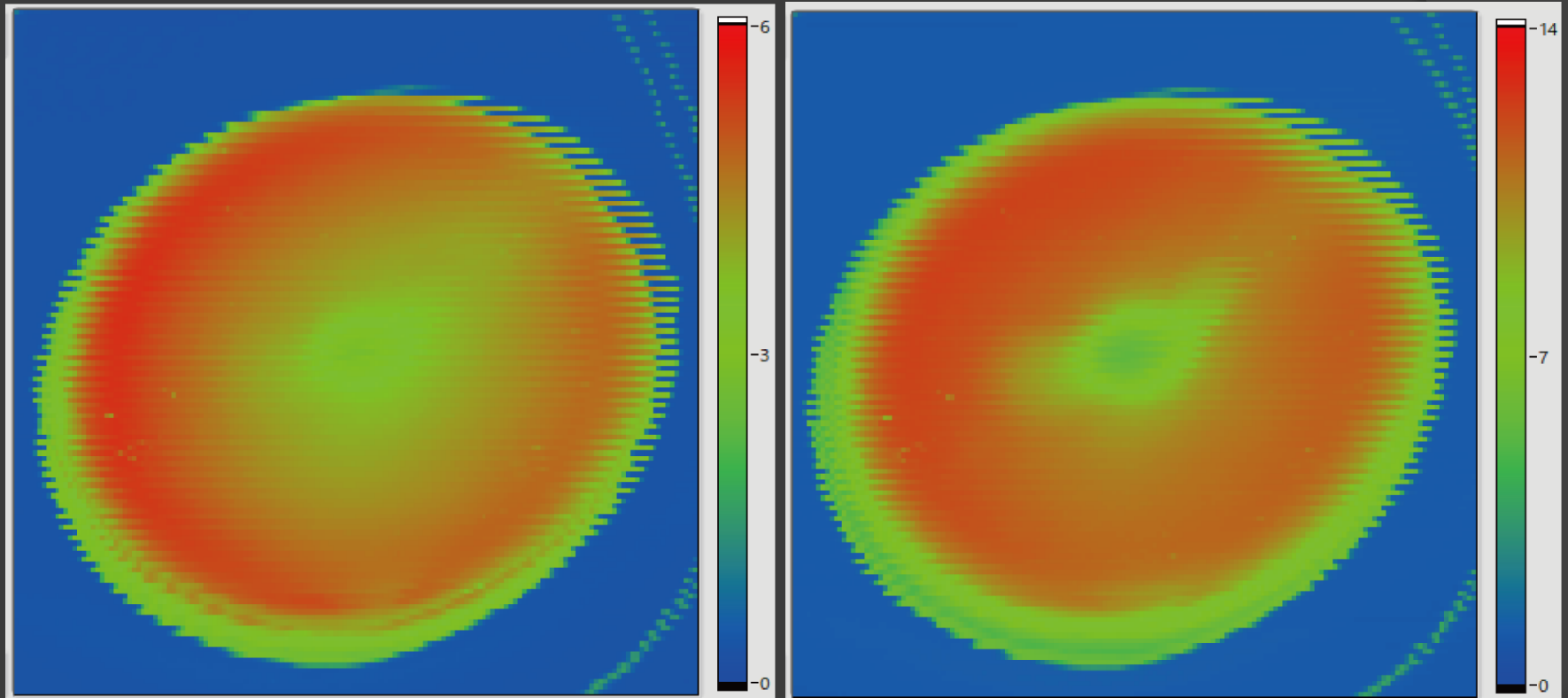


- ・ それまでの調整運転の影響で開始前のカソードQEはある程度低下。
- ・ Laser照射位置はカソード中央から約2mm外れた場所。
- ・ CW運転で引き出した電荷量：7.0 Coulomb
- ・ QE低下の割合はカソード中央部で最も大きい。

電子銃下流部で発生したイオンの逆流・衝撃による影響

# 500 kV安定運転

## カソードの再生前後のQE分布の比較



Cs蒸着前 (再生前)

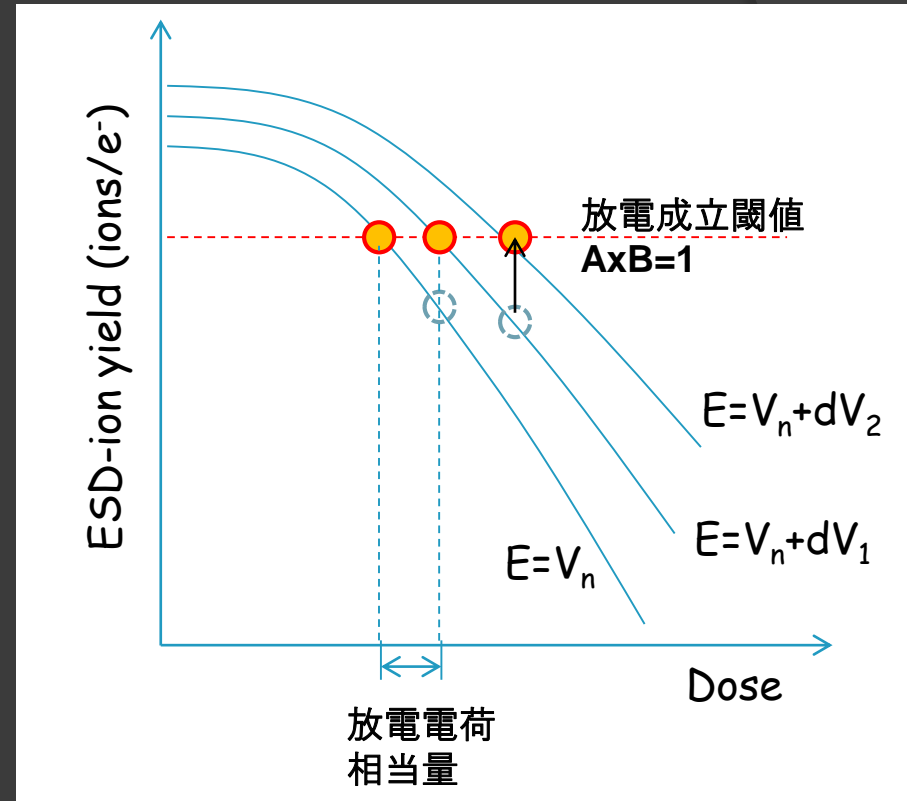
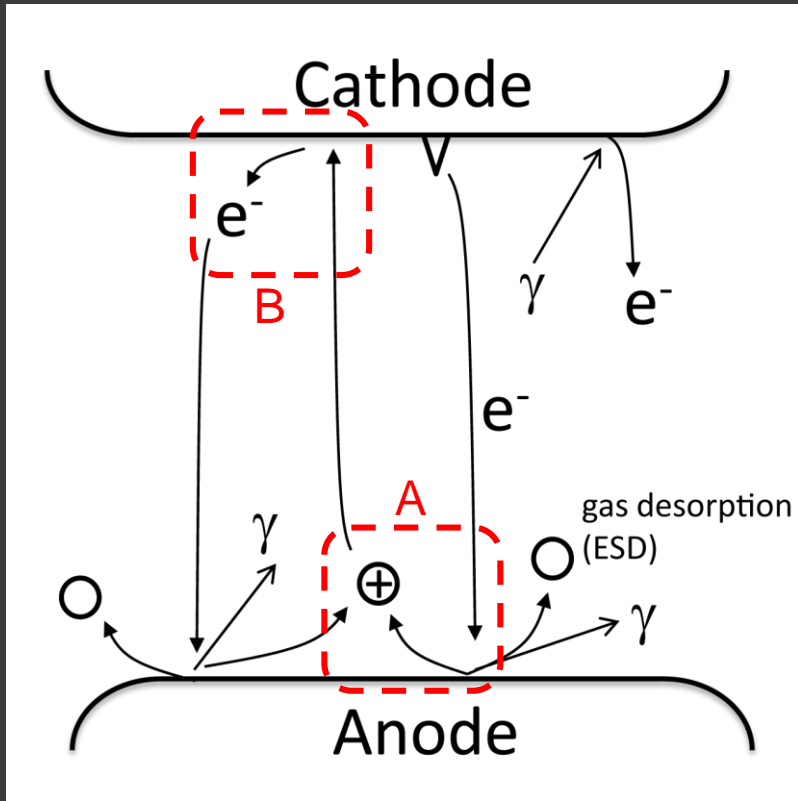
Cs蒸着後 (再生後)

- ・ イオン衝撃エリアはカソード中央部約 $\phi 2\text{mm}$ の範囲。
- ・ イオン衝撃を受けたエリアの再生は限定的。
- ・ イオン衝撃の影響がほぼ無いエリアは初期QEまで回復。

半導体カソードの場合はイオン衝撃エリア範囲外よりビーム発生が運用上必要

# 高電圧安定保持の背景

電子刺激脱離が関与する超高真空（UHV）中直流放電モデル



第13回日本加速器学会年会「超高真空における電子刺激脱離と直流放電現象の関係」より

- ・ 電子銃運転中の放電に至らない微小な電界放出が電子刺激脱離を減らす照射積算量に寄与。(例えば、 $10 \text{ pA} \times 280 \text{ hrs} \sim 10 \text{ } \mu\text{Coulomb}$ )
- ・ 結果としてコンディショニングが進行し、より放電が起きにくい状況へ。



## まとめ

- ・ 電子銃加速電圧 500 kVの安定運転
  - ・ 追加コンディショニングで放電閾電圧 510 kV以上。
  - ・ 無放電で累計 369時間。（継続中）
  - ・ 500 keV, 1 mA相当のCWビーム供給。
  - ・ カソード中央部にビーム起因のイオン衝撃領域確認。
- ・ 高電圧安定保持についての考察
  - ・ 電子刺激脱離が関与するUHV中DC放電モデルから考察。
  - ・ 電子銃安定運転によるコンディショニング効果。
  - ・ 今後も500 kV安定運転を継続できる裏付け。

## 謝辞

ここに挙げた成果はcERL運転に関わられたすべての方の協力によるものです。この場をお借りして感謝申し上げます。  
本研究の一部は、科研費 15H03594, 16K05385 により実施されました。