



電子銃開発

コンパクトERL評価専門委員会
2017年10月27日（金）

高エネルギー加速器研究機構
加速器第7研究系
山本将博

Contents

1. 電子源開発の目標
2. 電子銃開発
 - ・ 1号機開発 & cERL電子銃運転
 - ・ 運転時に発生した問題
 - ・ 2号機開発
3. ドライブLaserシステム
4. カソード開発（半導体 & マルチアルカリカソード）
5. まとめ

開発目標

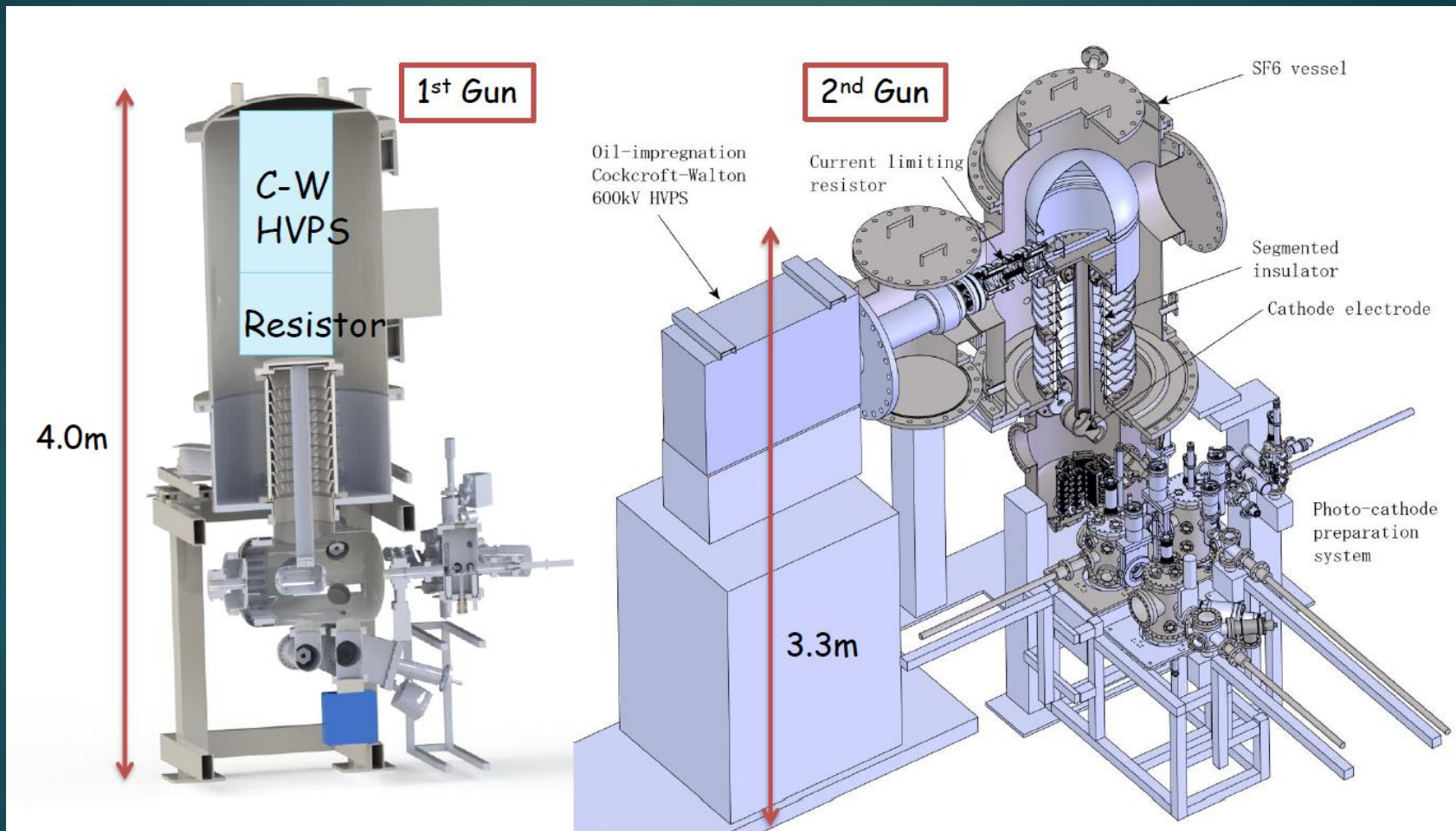
- 加速電圧：500 kV
- ビーム電流：10 mA
- 規格化エミッタンス
 - < 0.1 $\mu\text{m rad}$ @ 7.7 pC/bunch
 - < 1 $\mu\text{m rad}$ @ 77 pC/bunch

具体的な数値は明確ではないがとにかく重要なことは。。

- ビームの安定供給
 - 量子効率の高いカソードの利用と高い量子効率の維持
 - 極高真空と高電圧の安定保持
 - 高出力ドライブレーザーの利用と安定出力の維持
 - カソード交換の容易性

電子銃開発

開発当初、世界の何処も500kVの印可に成功していない。
2台開発体制でチャレンジ&cERL運転を目指す。



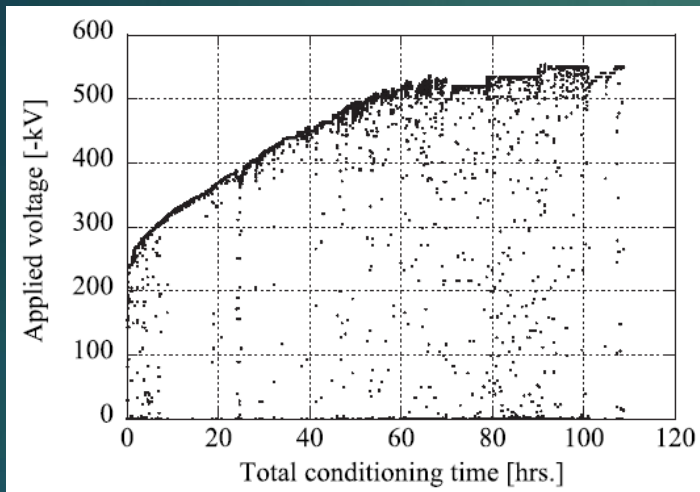
2007年より開発開始。
2012年にcERL加速器へ設置。

2009年より開発開始。（KEK PF-AR南棟エリア）
2015年4月よりビーム試験開始。
1号機のバックアップおよびR&D機として。

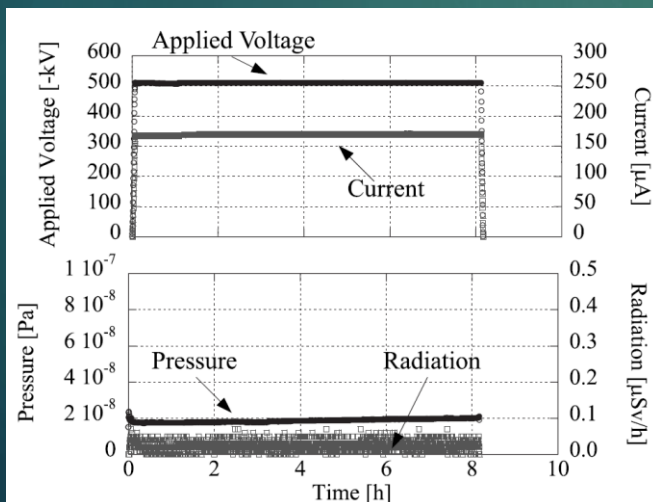
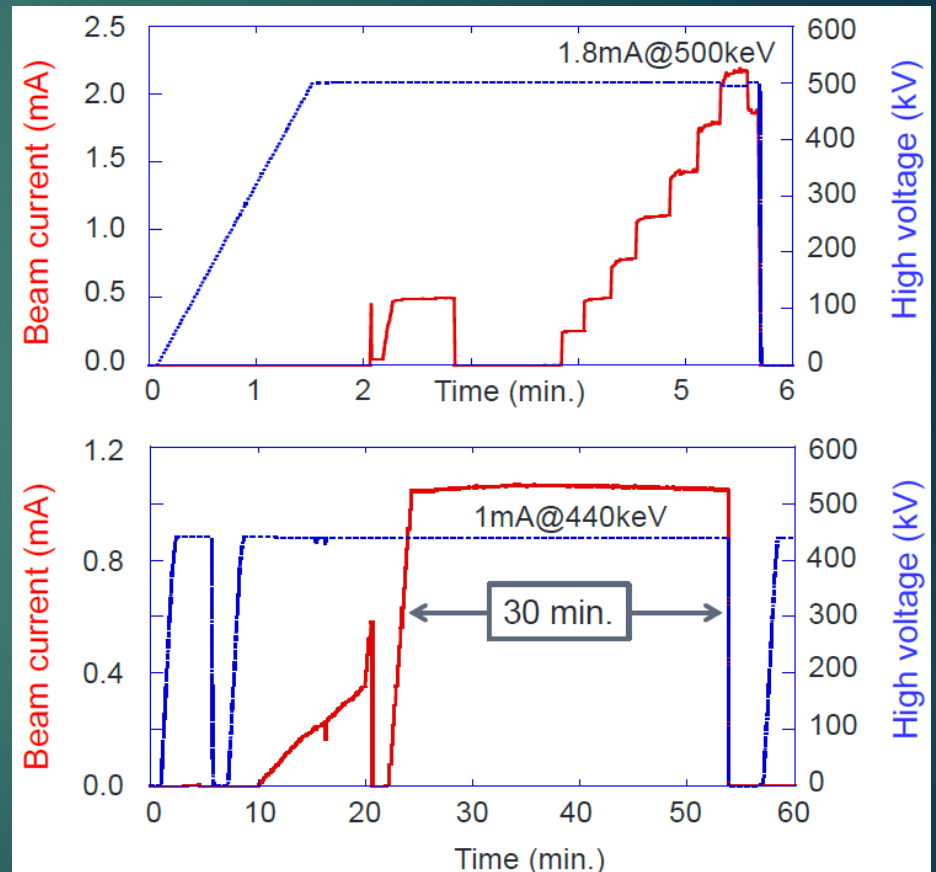
1号機JAEAでの試験

電極有りの状態で550kVまでの印可に初めて成功。
500 keVビームの生成にも成功。

R.Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).



N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett 102, 234103 (2013).



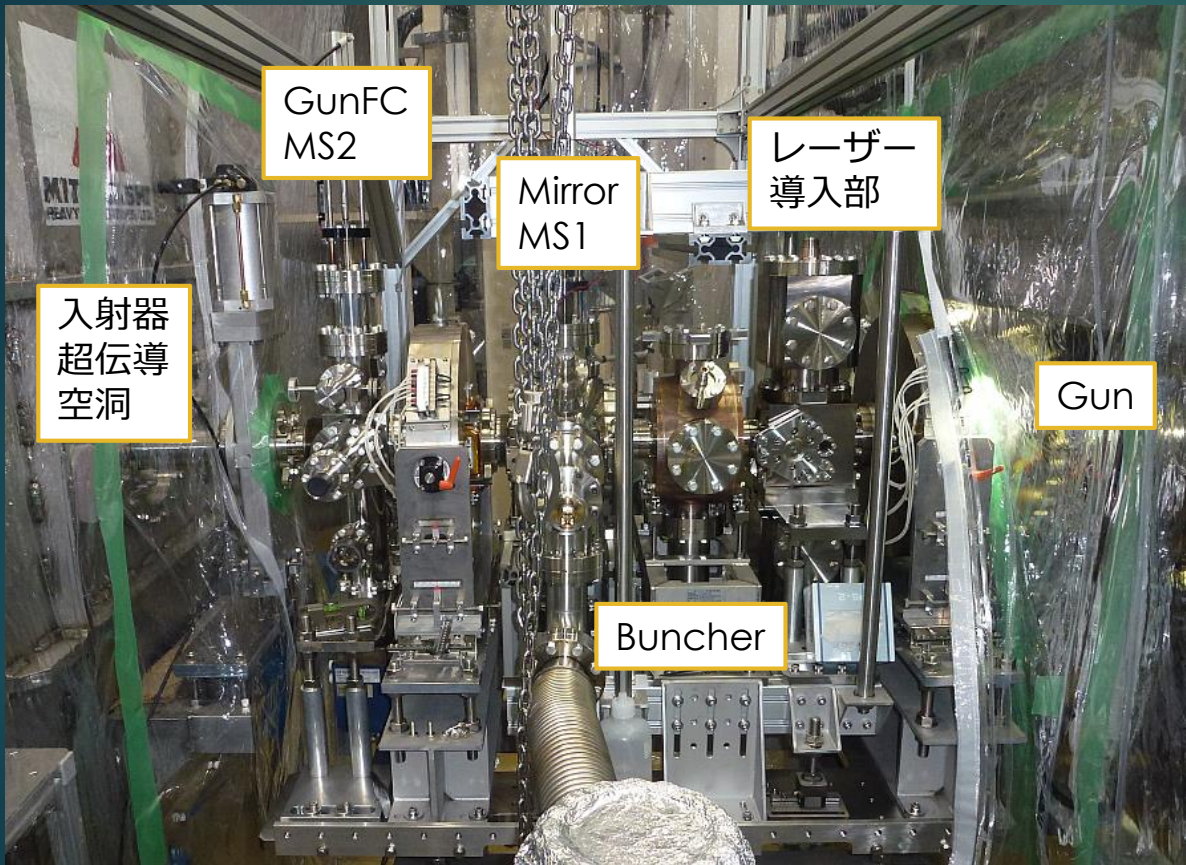
高圧電源の出力が500kVで1.8mAの上限となる
問題が判明。

1号機、入射部のインストール



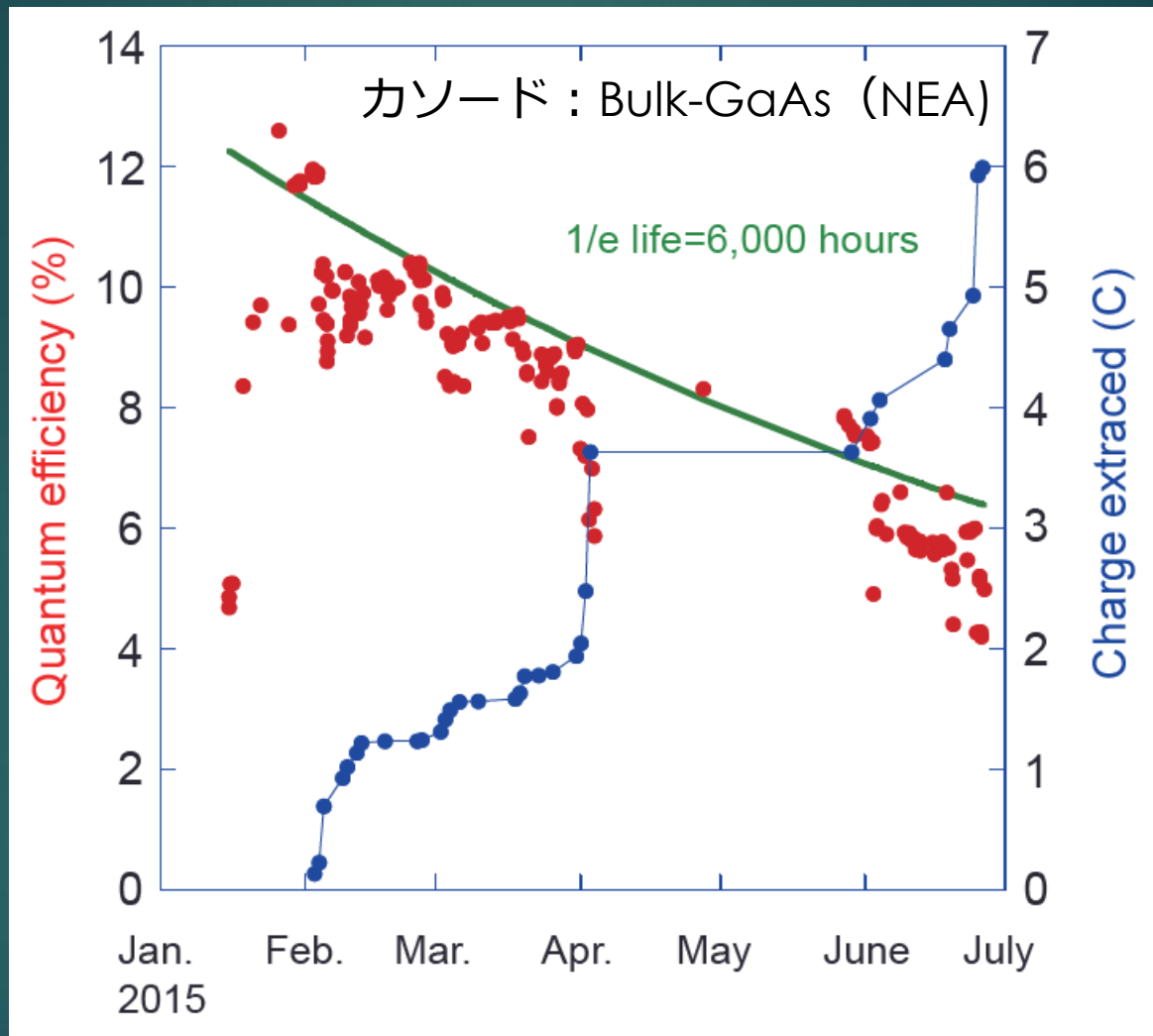
- 1号機（以降CERL電子銃）インストール後、セラミック管トラブル（10段中上下各1段が不良）により安定にかけられる電圧は390kVとなる。

1号機、入射部のインストール



- ・電子銃および入射空洞の中間領域となる入射部は極高真空が実現できる設計とし、装置はクリーンルーム内で組み上げ。

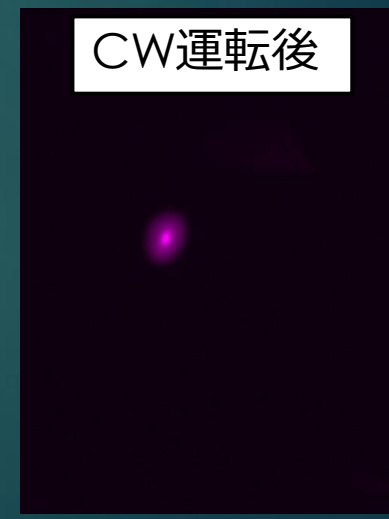
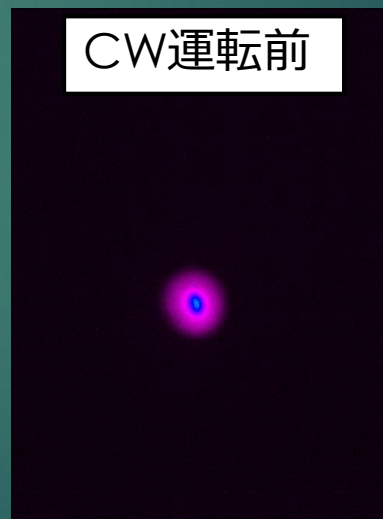
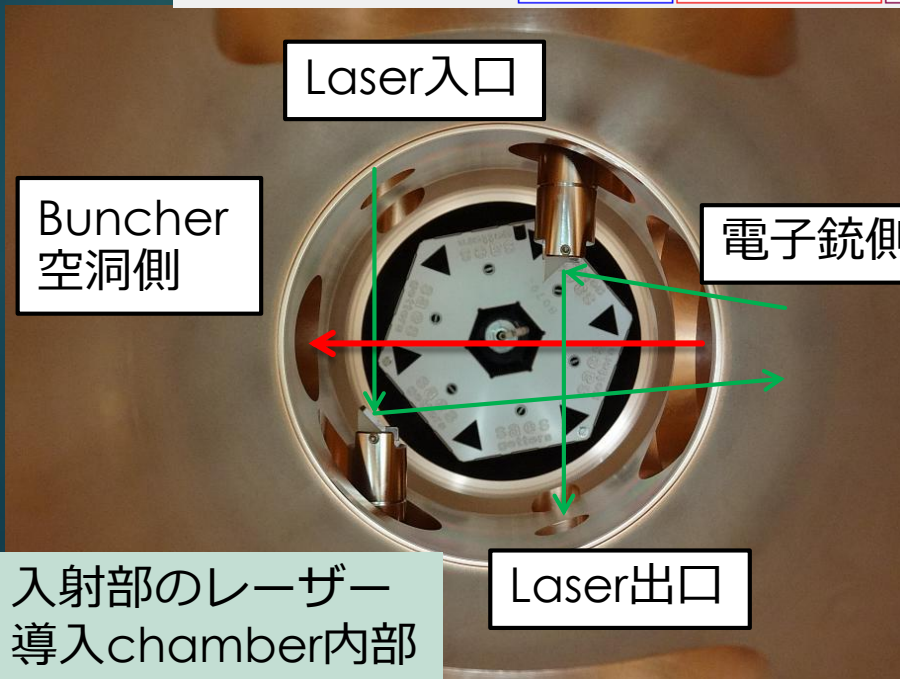
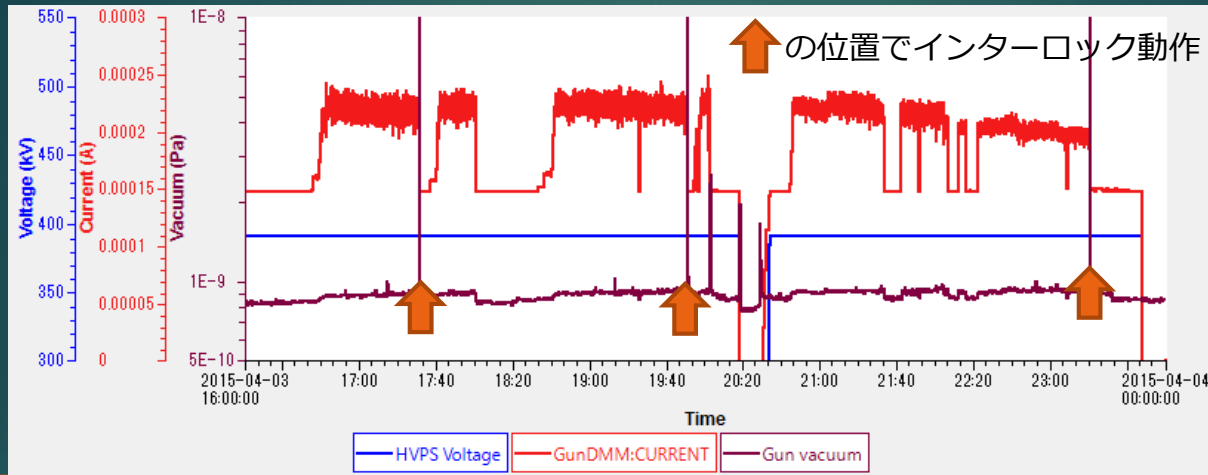
カソードの暗寿命について



電子銃は 1×10^{-9} Pa以下の極高真空を維持。
断続的な微小ビーム電流供給範囲ではカソード寿命は真空で決まる～6000時間。

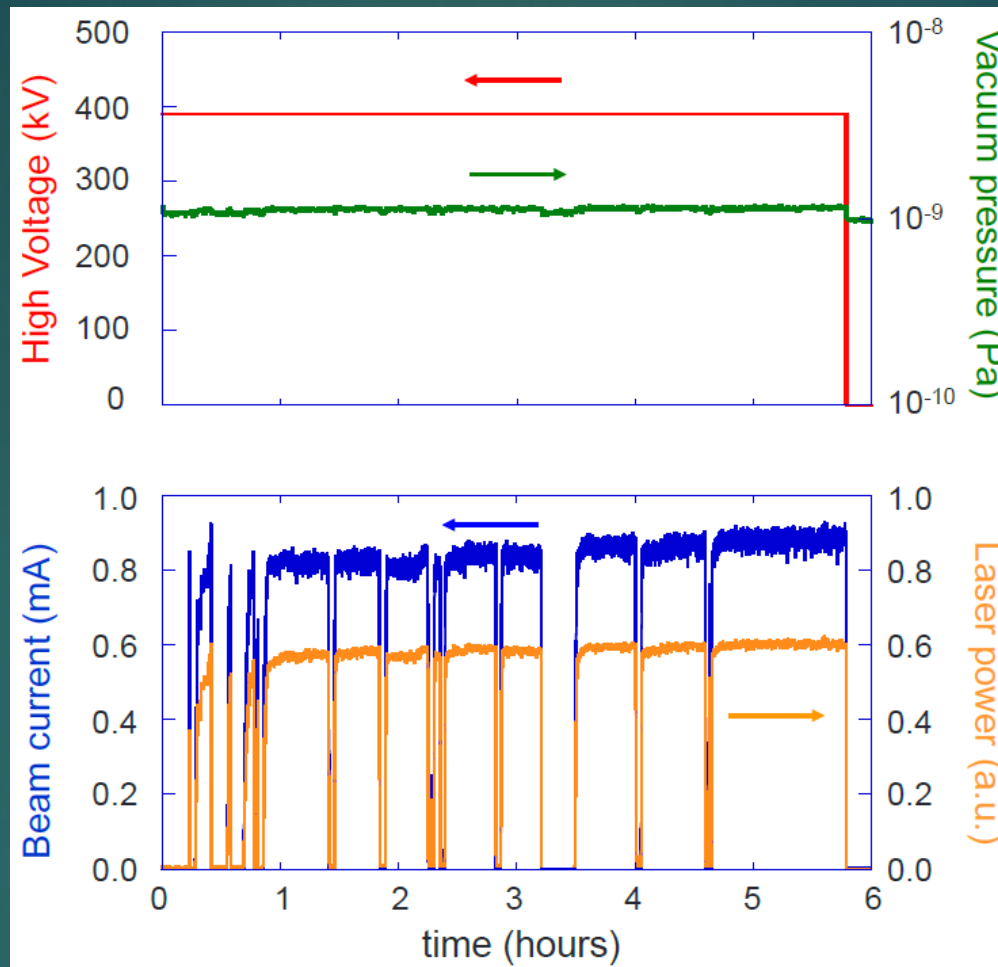
CW運転時のチャージアップ問題と対策(2015年)

ビームハローがレーザー導入用ミラーに当たりチャージアップ。
下流のビーム軌道が変動する問題が発生。



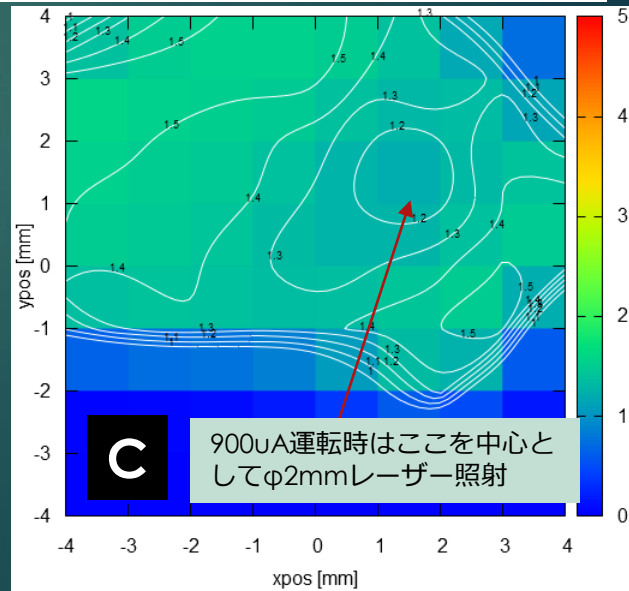
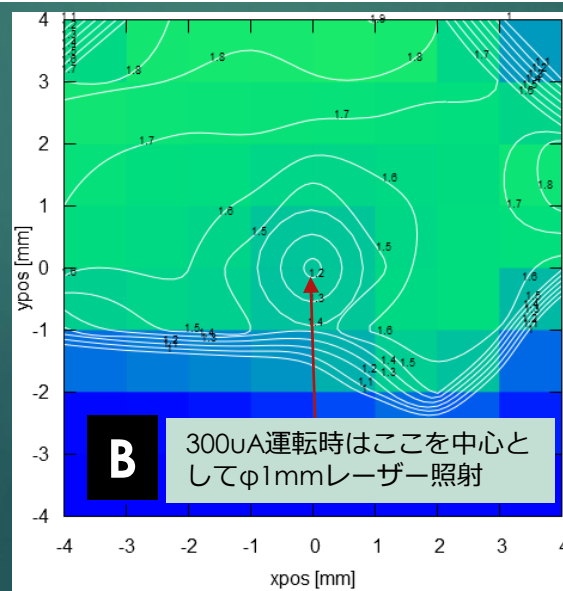
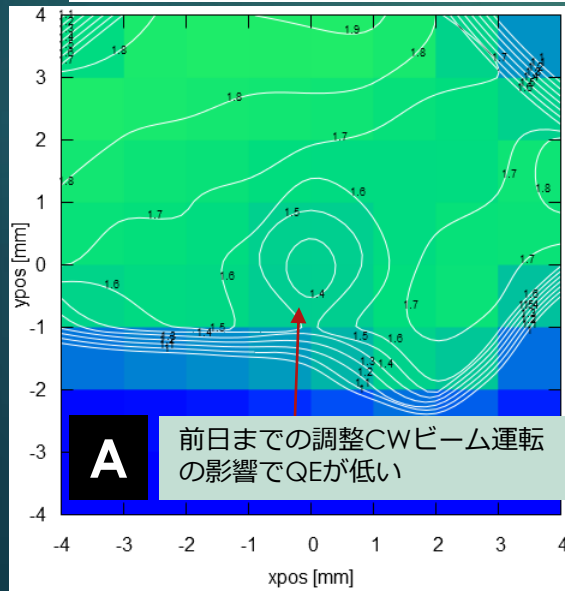
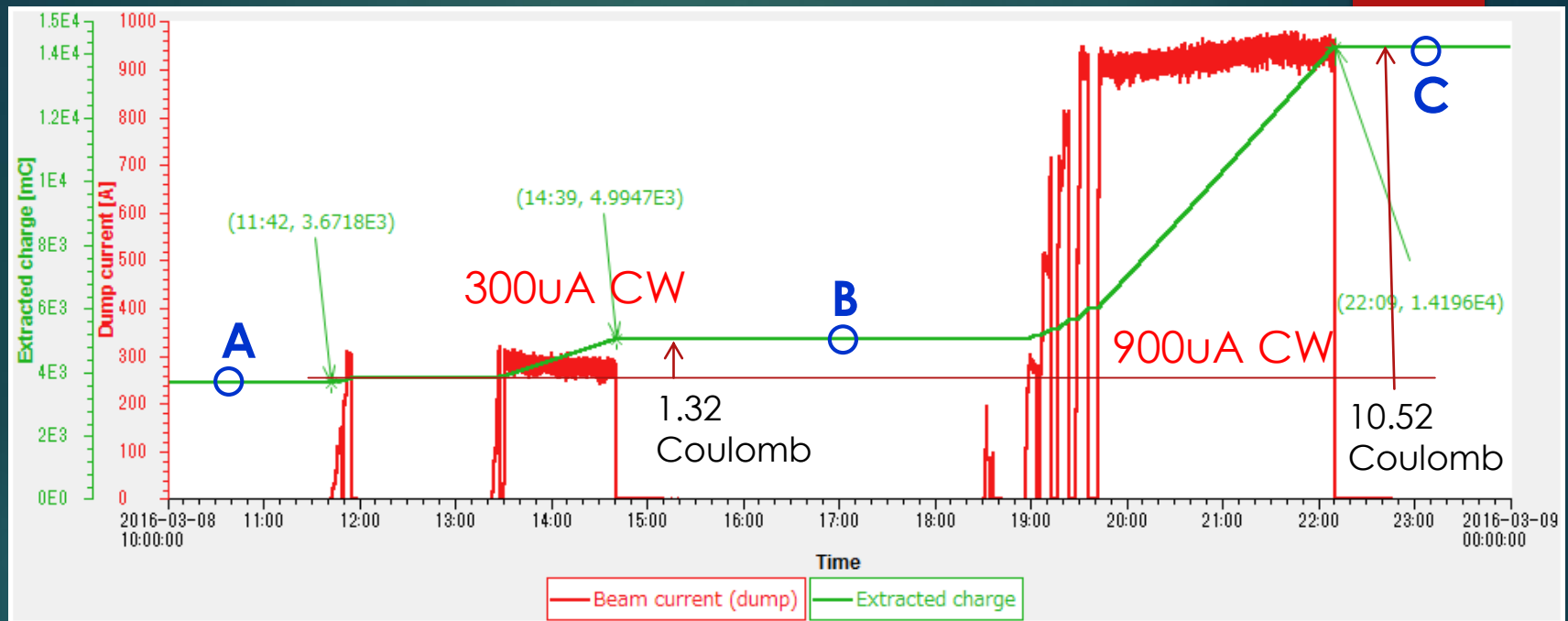
6/24 19:28
アルミ金属ミラーへ変更で問題解消。

900 μ A CW運転とカソードの寿命について

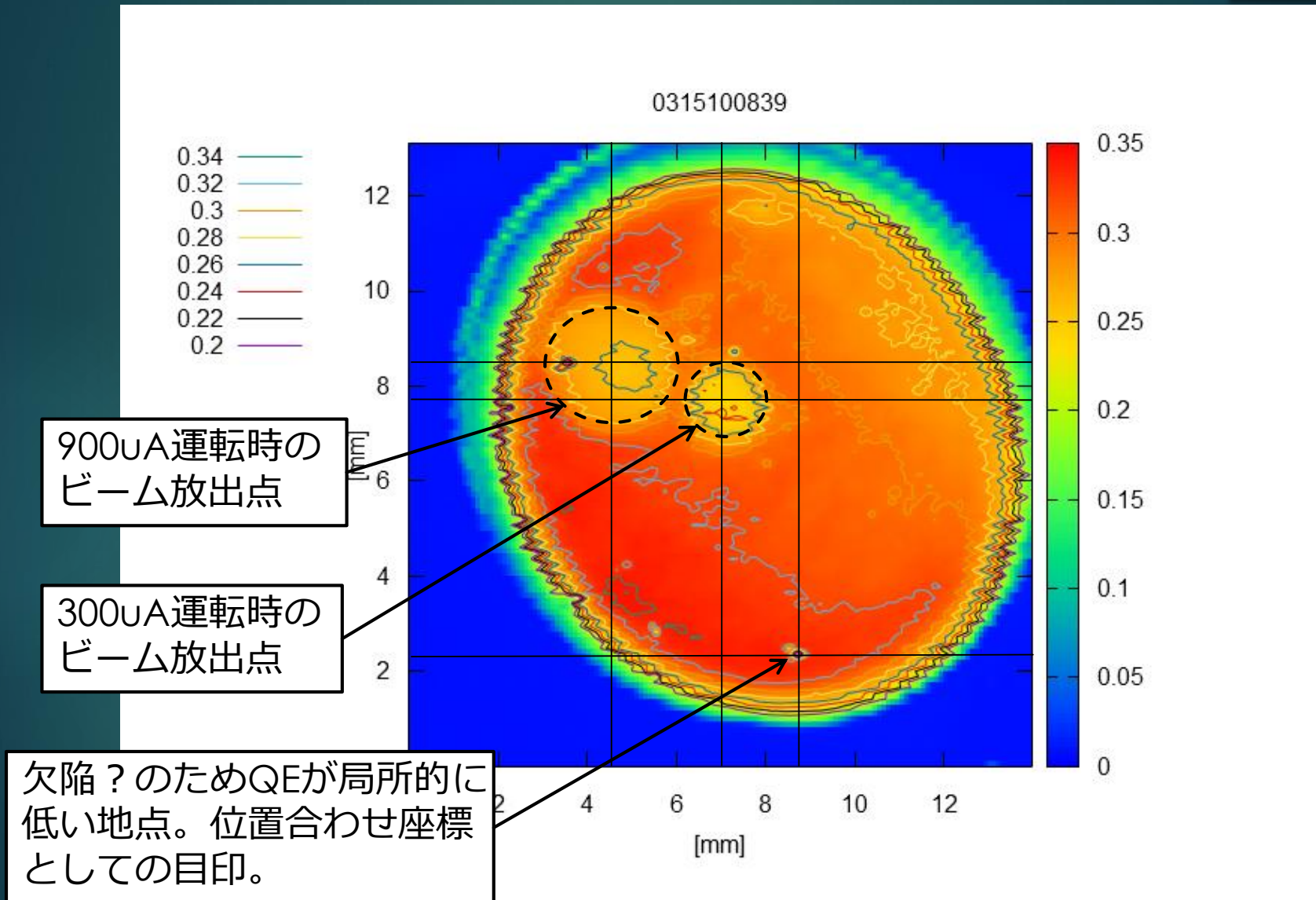


- 数時間の運転ではるが、QEの明確な低下は見られず。2%程度で安定。
- ビーム運転時に電子銃および入射空洞手前までの真空変化ほとんど無し。
電子銃および入射部の徹底した真空設計が功を奏した。
- CW運転中断はドライブレザーの共振器長自動調整に因る。

CW運転前後のQE分布の変化

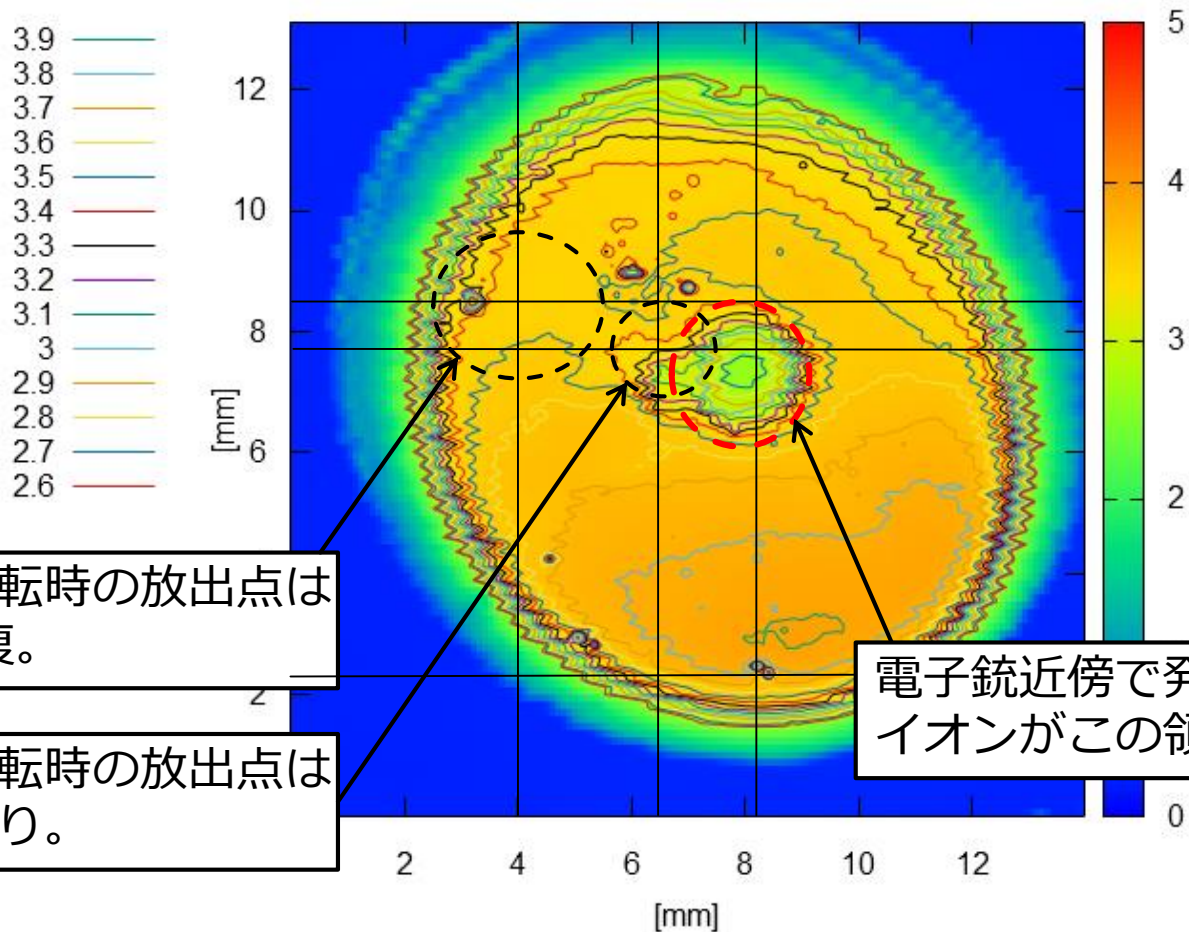


QE分布の詳細測定 (@カソード準備系)



Cs再蒸着後のQE分布の詳細測定

0315103834



900 μ A運転時の放出点は
QEは回復。

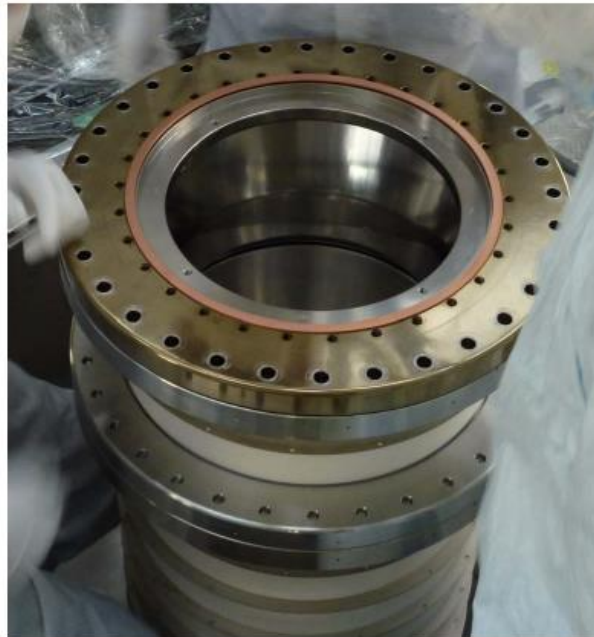
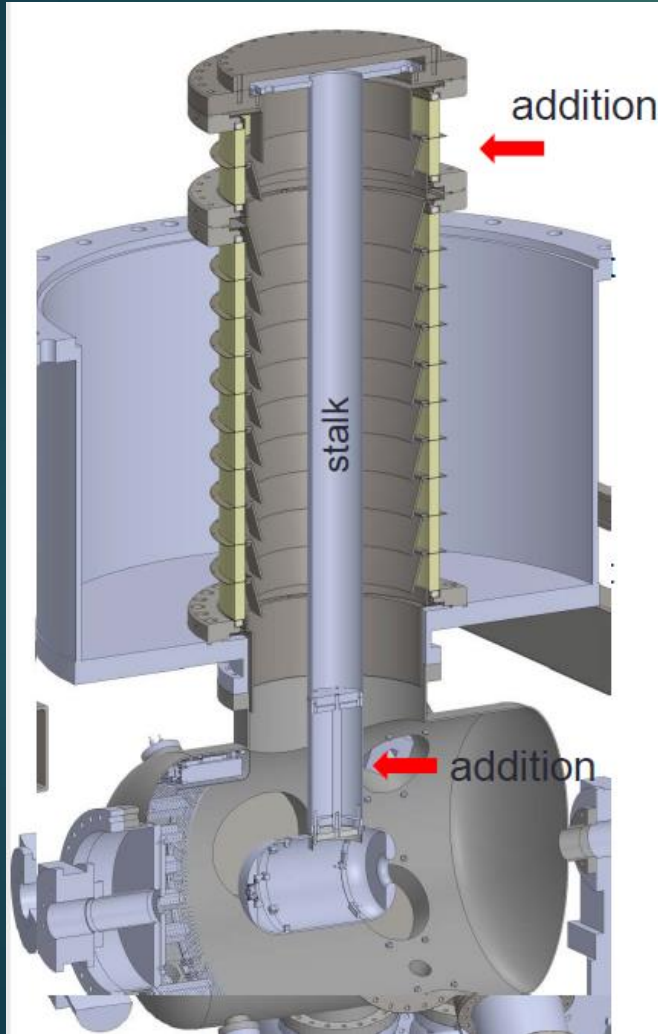
300 μ A運転時の放出点は
このあたり。

電子銃近傍で発生した
イオンがこの領域を叩く

電子ビーム放出領域と回復不全領域は一致しない。
ビーム放出領域をイオン衝撃領域から外した運転が望ましい。

500kV運転に向けた改造

絶縁不良が起きた2段分を補うためのセラミック管を追加。

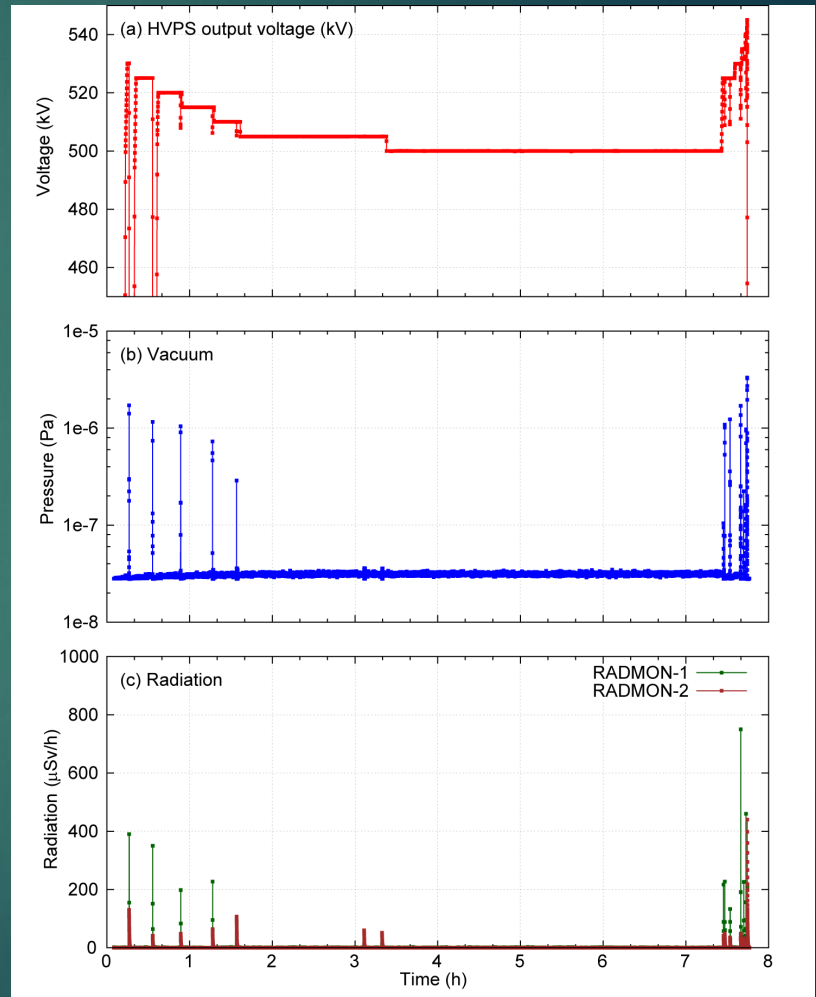
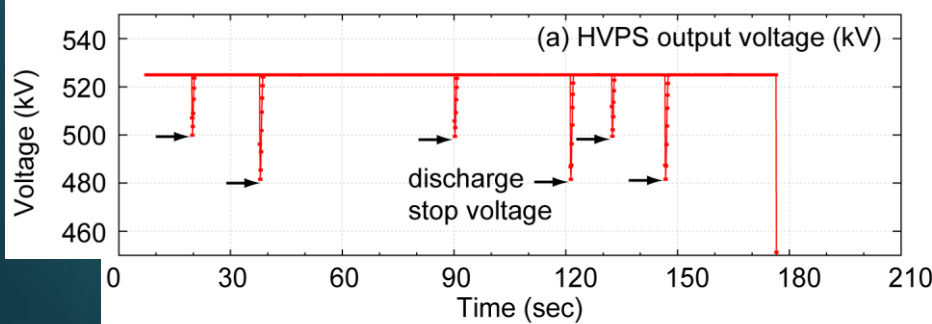
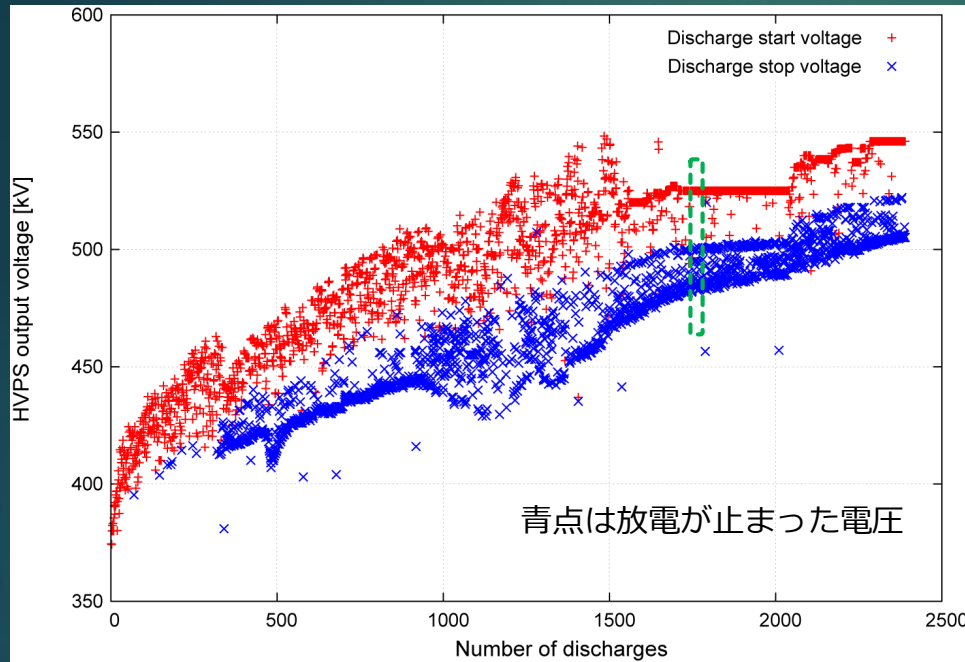


- Installed an additional ceramics in July 2015
- Performed HV test up to 550 kV without stalk
- Installed a stalk in Sep. 2015
- Replaced the stalk in Nov. 2015
- Under HV test with cathode electrode
- Perform beam generation in Feb. 2016

高電圧コンディショニング

加速電圧上限390 kVは解消。
放電閾電圧を発見。実験的に安定印可電圧がわかる。

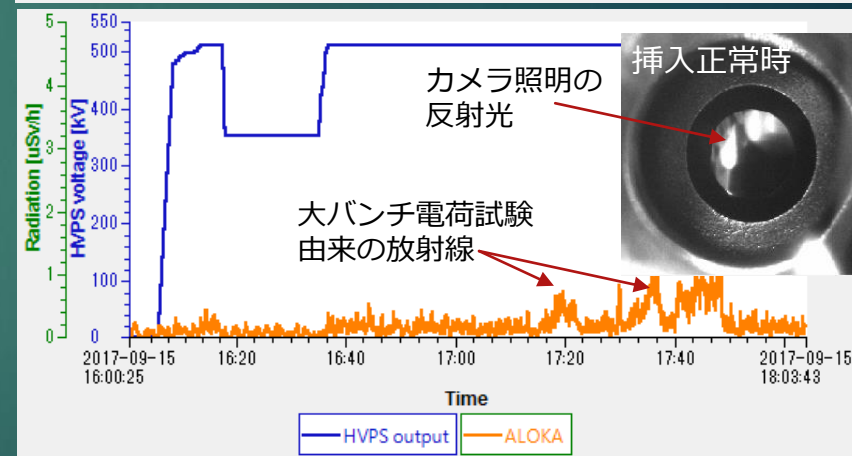
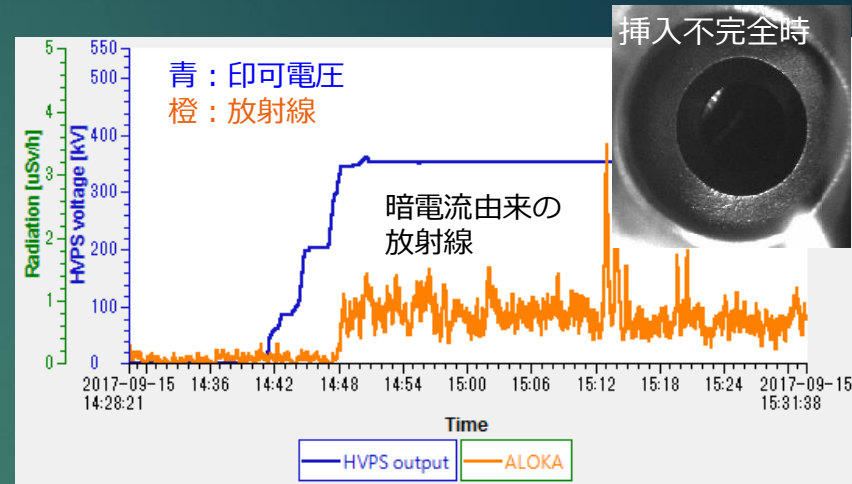
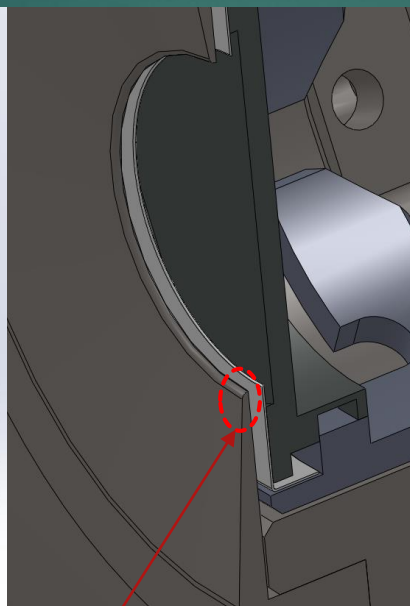
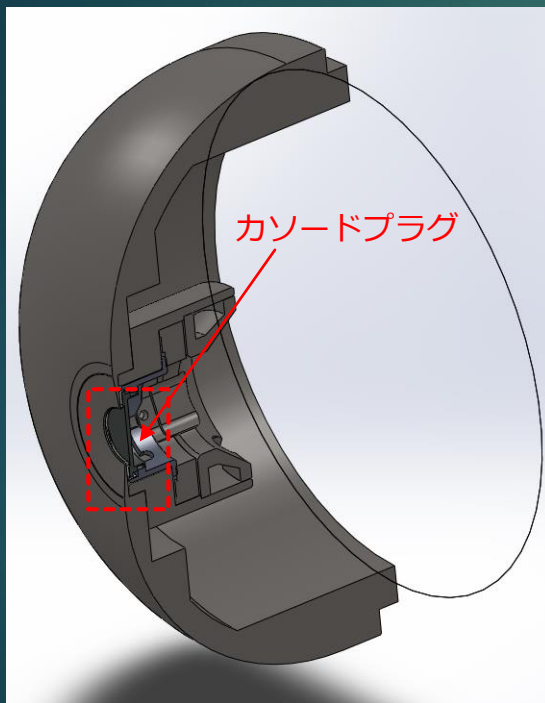
M. Yamamoto and N. Nishimori, Appl. Phys. Lett. 109, 014103 (2016).



閾電圧未満の印可電圧では放電は発生しない。

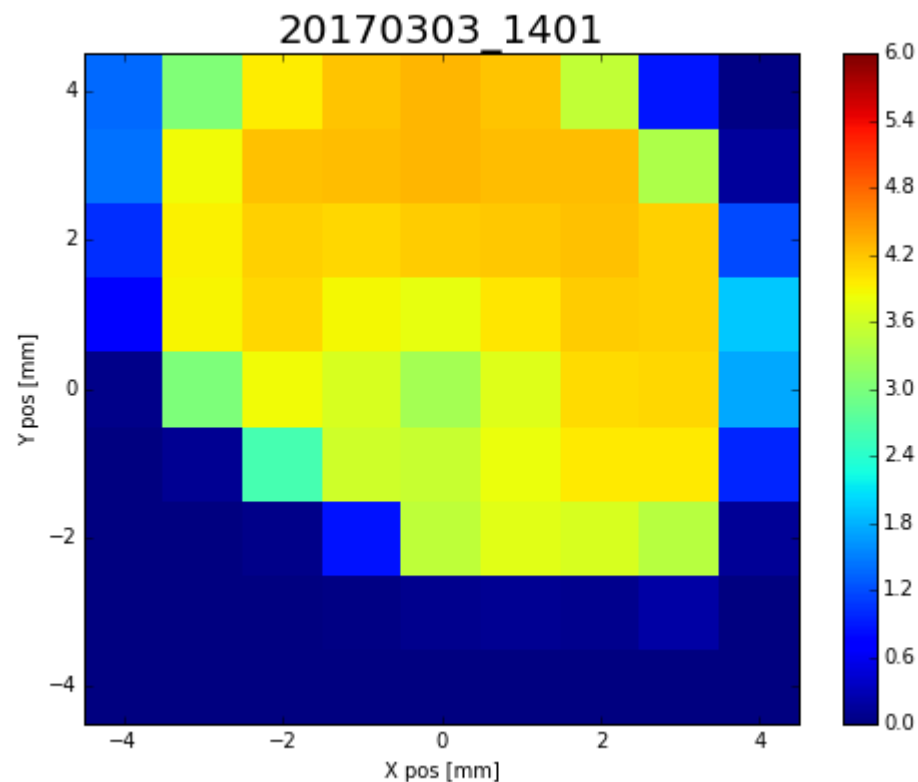
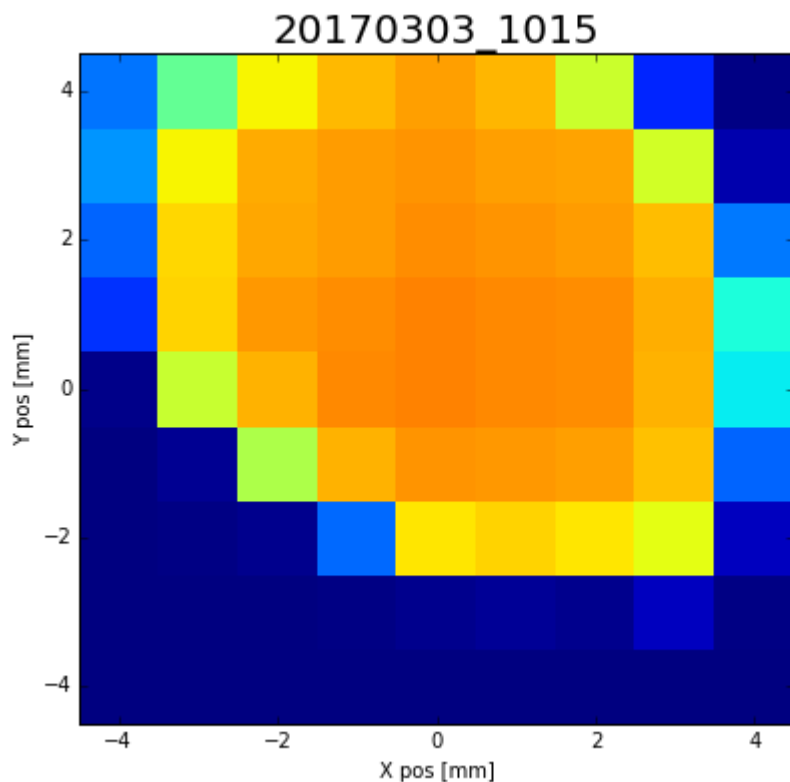
カソード固定状態と暗電流発生の問題

GaAsカソード無し状態で500kV印可はOKだが、カソード導入後に暗電流が発生し、印可電圧を制限。



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。

入射部スクリーンモニターのcharge up問題



放電前 QE:4.6%

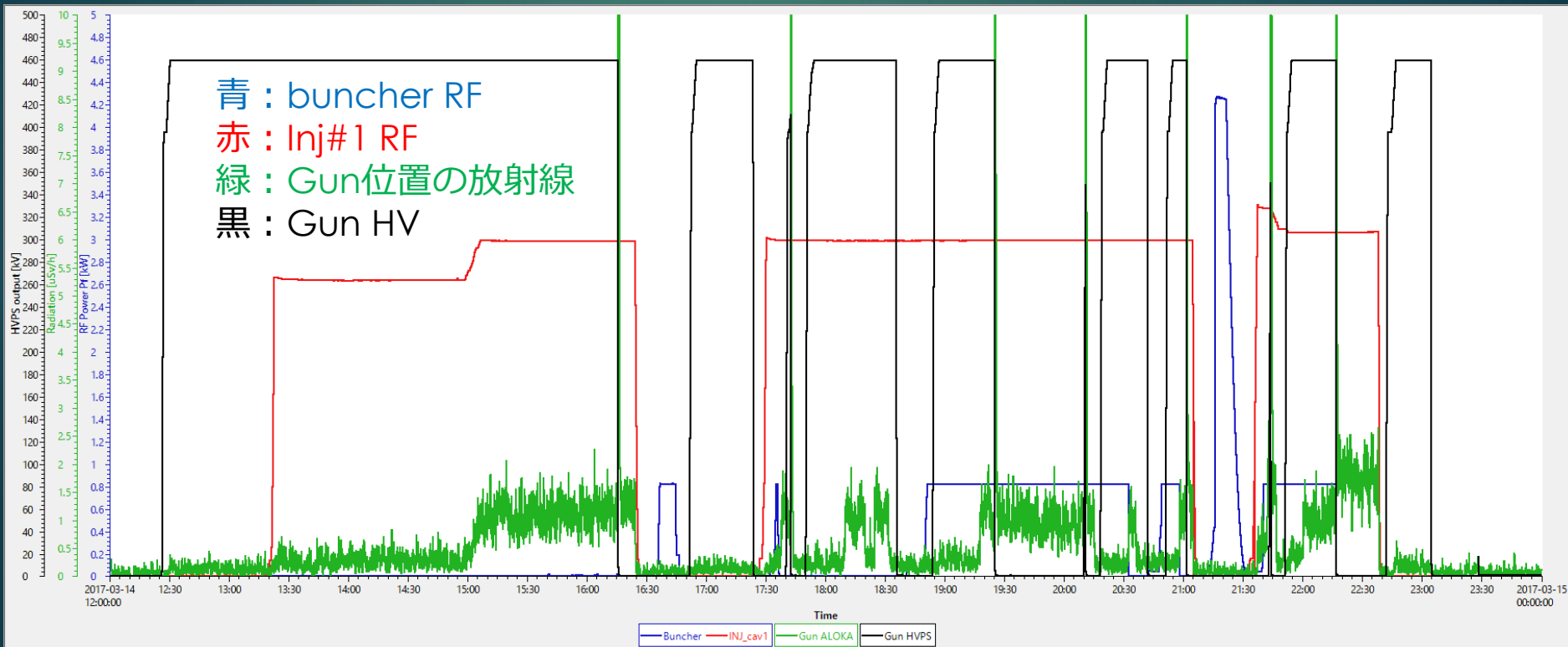
放電後 QE:3.3%

- スクリーンの放電現象によりカソード中央でQEが局所的に低下。
- マクロパルス内のバンチ電荷量が約50nCあたりを超えると起き始める。
- マクロパルス幅を十分短くする (~100ns以下) ことで問題は回避できる。

入射器空洞のFE起因で発生する問題

- 運転中に放射線ITLKでダウンする事象が1日に7回発生。
- 放射線発生場所は入射空洞下流（合流部あたり）
- 加速器室内の他の合流部付近の放射線モニターも高い値を示している。
- **全てのITLK事象で入射空洞#1のfield emissionによってGunの放射線モニターが数uSv/h程度感知している状況で電子銃のHVがかかっている。**
- 入射空洞#1の電界を下げることで問題が起きなくなった。

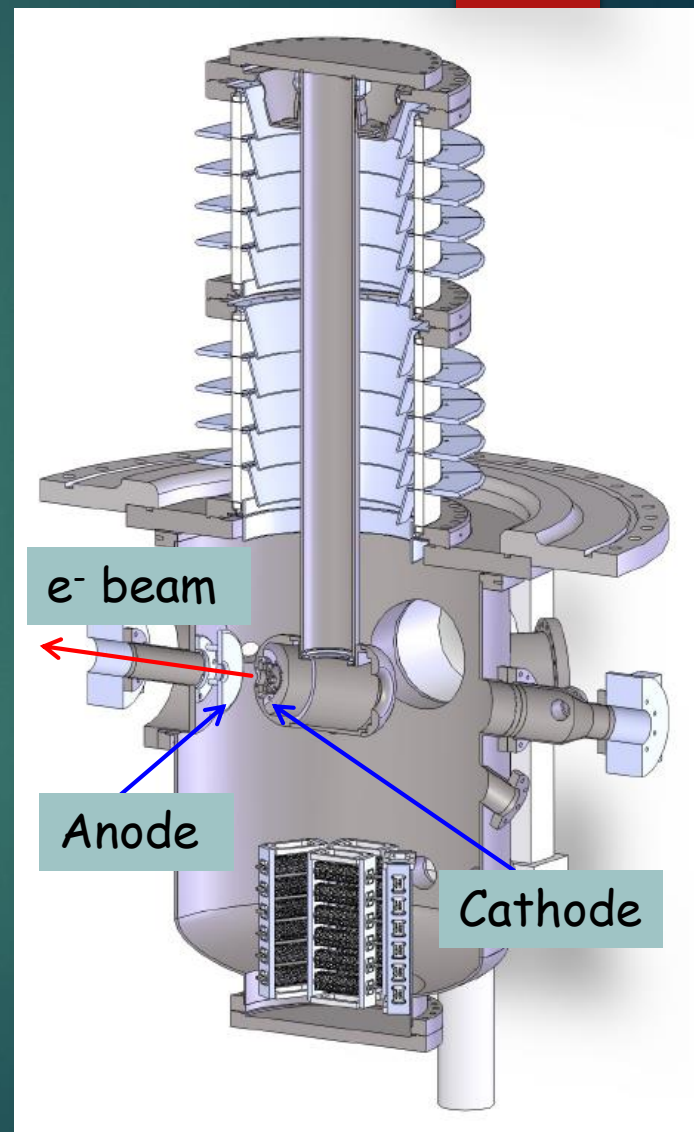
入射空洞のFEの一部が電子銃へ入射、カソードからビーム発生が原因か。



電子銃2号機の開発

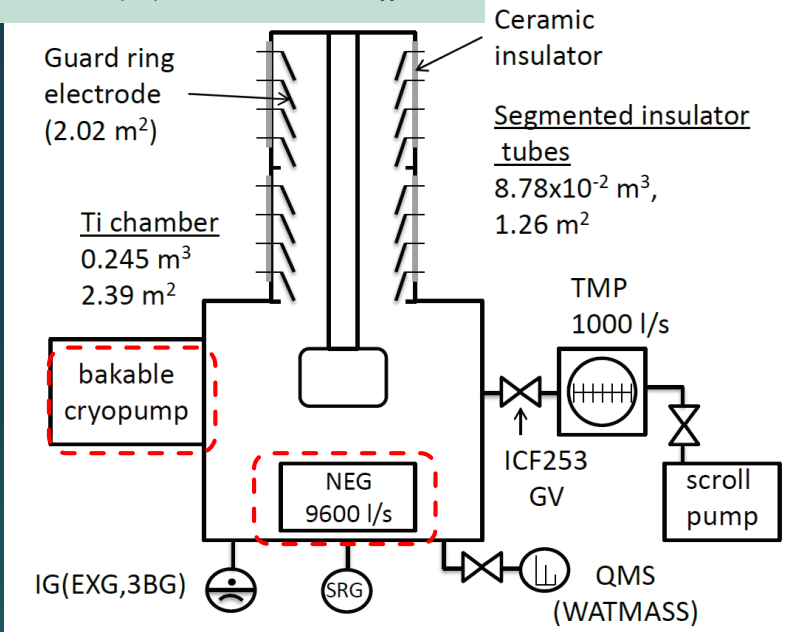
電子銃の基本形状は1号機と同じ。
より新しい技術、素材などを採用。

- ▶ 高電圧絶縁に優れたセラミック管
 - ▶ 5分割セラミック管2組
 - ▶ 耐浴面放電セラミック材料(TA010, Kyocera)
- ▶ 極低ガス放出材料
 - ▶ Titanium chamber
 - ▶ Titanium electrodes & guard rings
 - Non welding parts for in-vacuum components
- ▶ 優れた排気性能を有する排気系
 - ▶ 4K Bakeable cryopump & NEG pumps
- ▶ 絶縁型アノード電極 & リペラ電極
 - ▶ 暗電流モニター
 - ▶ 下流部のイオン逆流防止

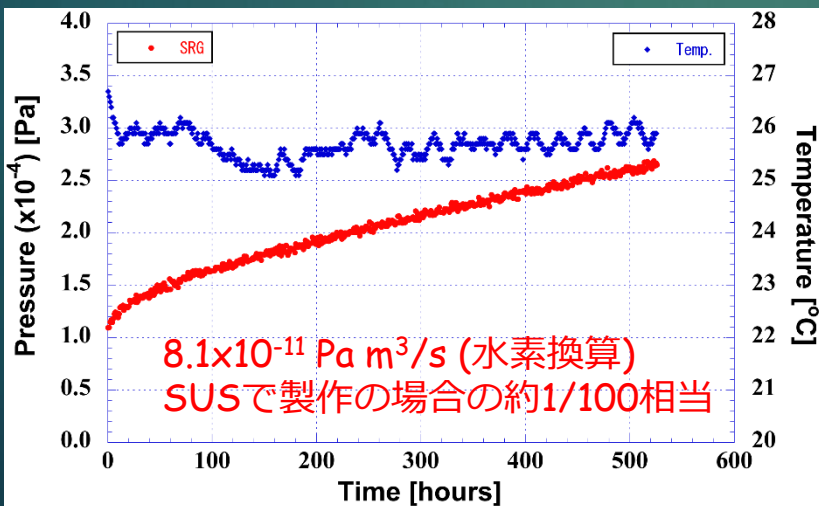
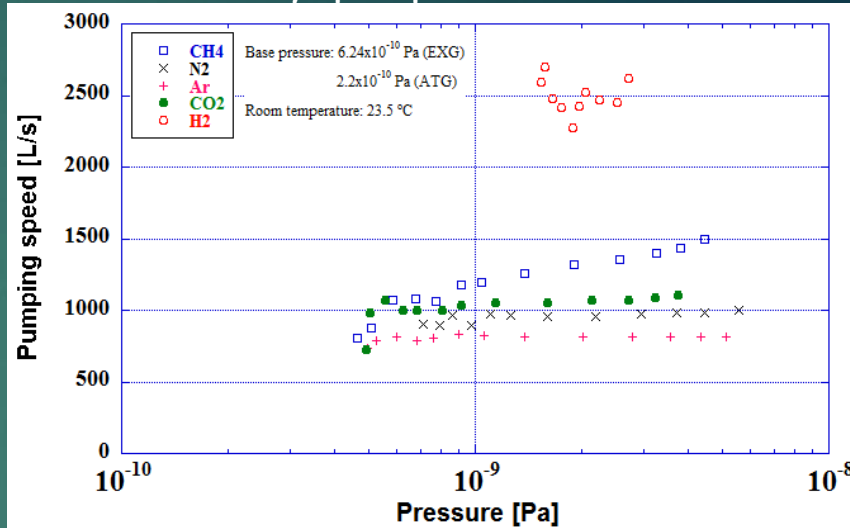


電子銃2号機の真空システム評価

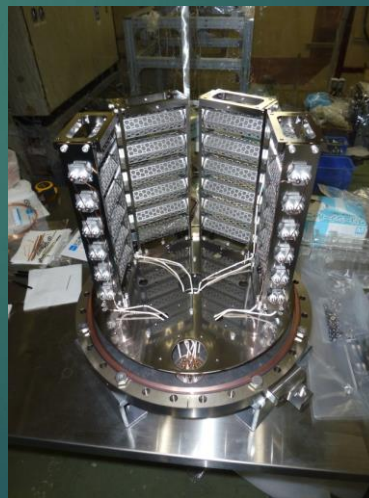
2号機の真空システム構成



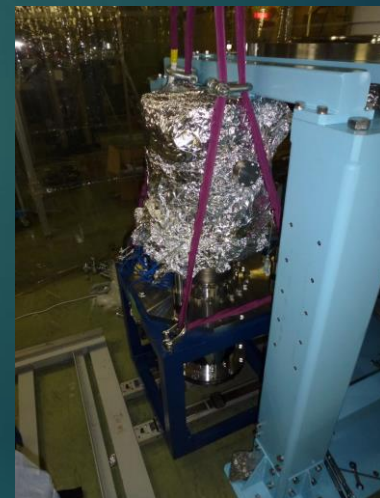
Bakable cryopumpの排気速度測定結果



全ガス放出速度の評価結果

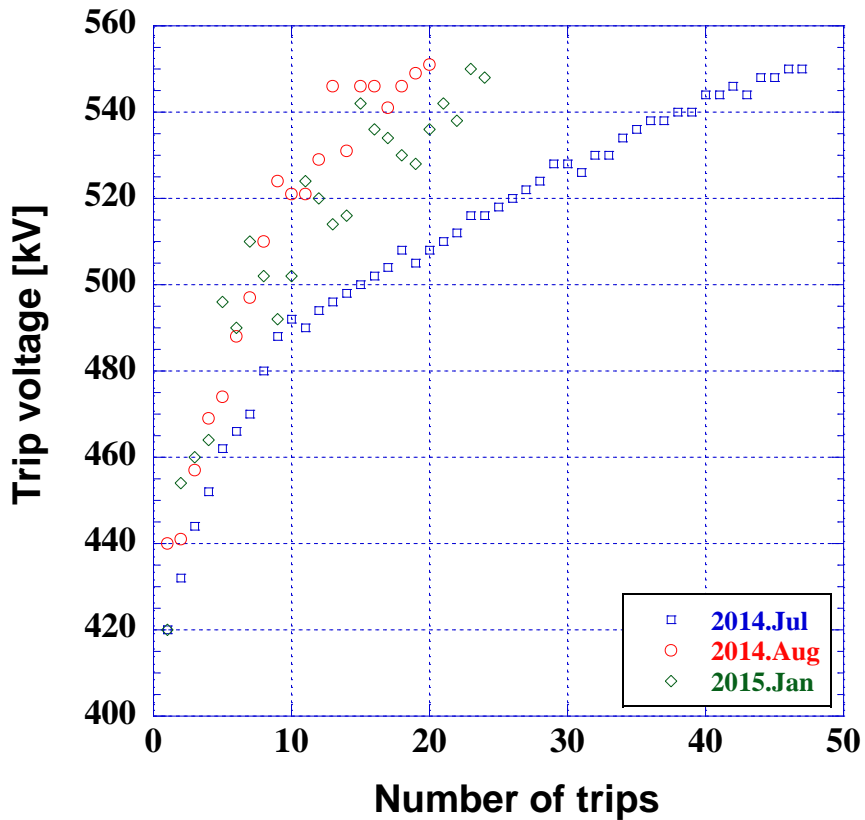


NEG pump set



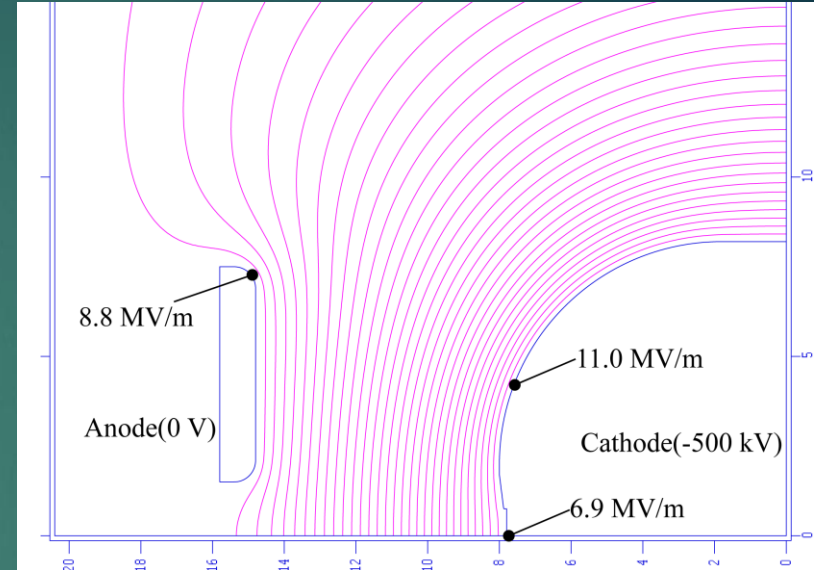
4K bakable cryopump

電子銃2号機の高電圧試験

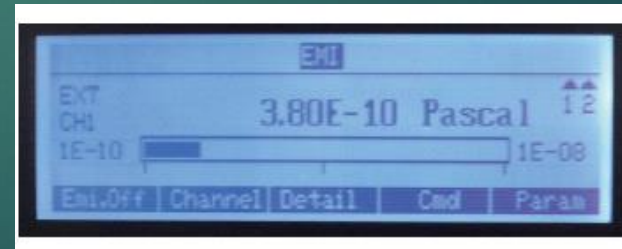


2014年に550kVコンディショニング達成。
以降は短時間でコンディショニング完了。

コンディショニング後の加速電圧500 kV保持
試験。延べ50時間以上放電無く試験終了。



加速電圧500 kV時のカソード中心の
加速電界は6.9 MV/m。
高電圧DC電子銃では最高クラス。



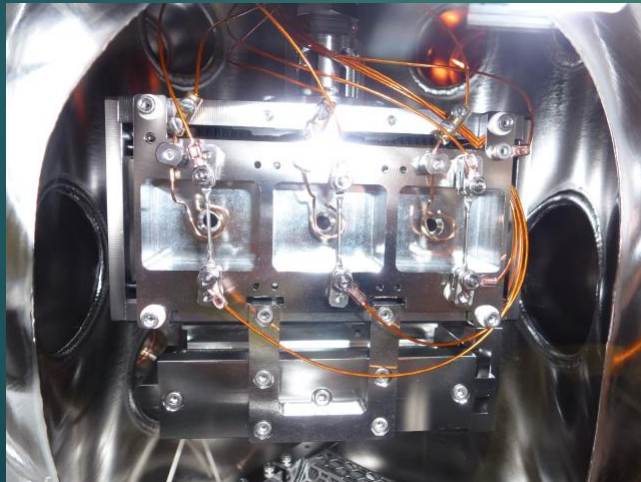
極高真空計での圧力評価。
長期的に 4×10^{-10} Pa以下を実現。

電子銃2号機のカソード準備装置

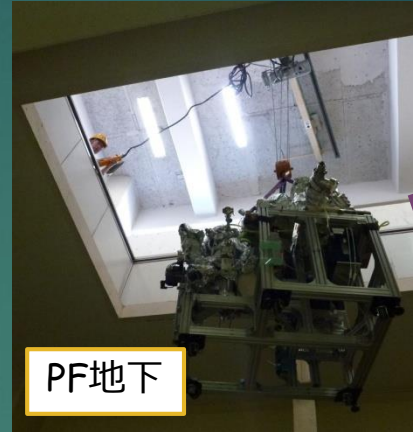
複数のカソードを同時に扱う。
効率的なカソード交換システム。



3つのGaAsカソードの同時活性化(QE:6~10%)
を実証。(2014/Sep.)



Cs蒸着 & QE測定chamber内部の写真



PF地下

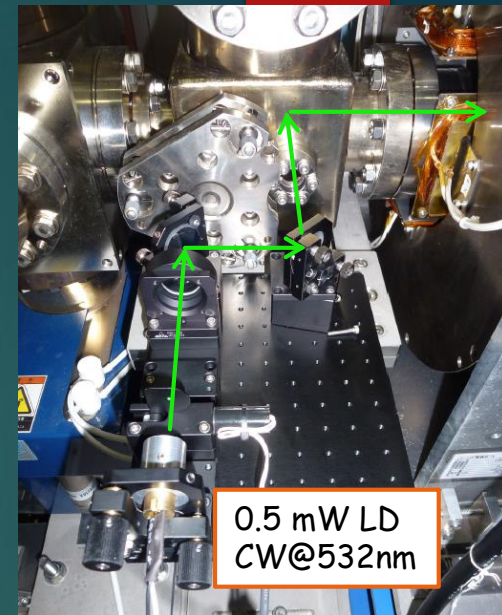
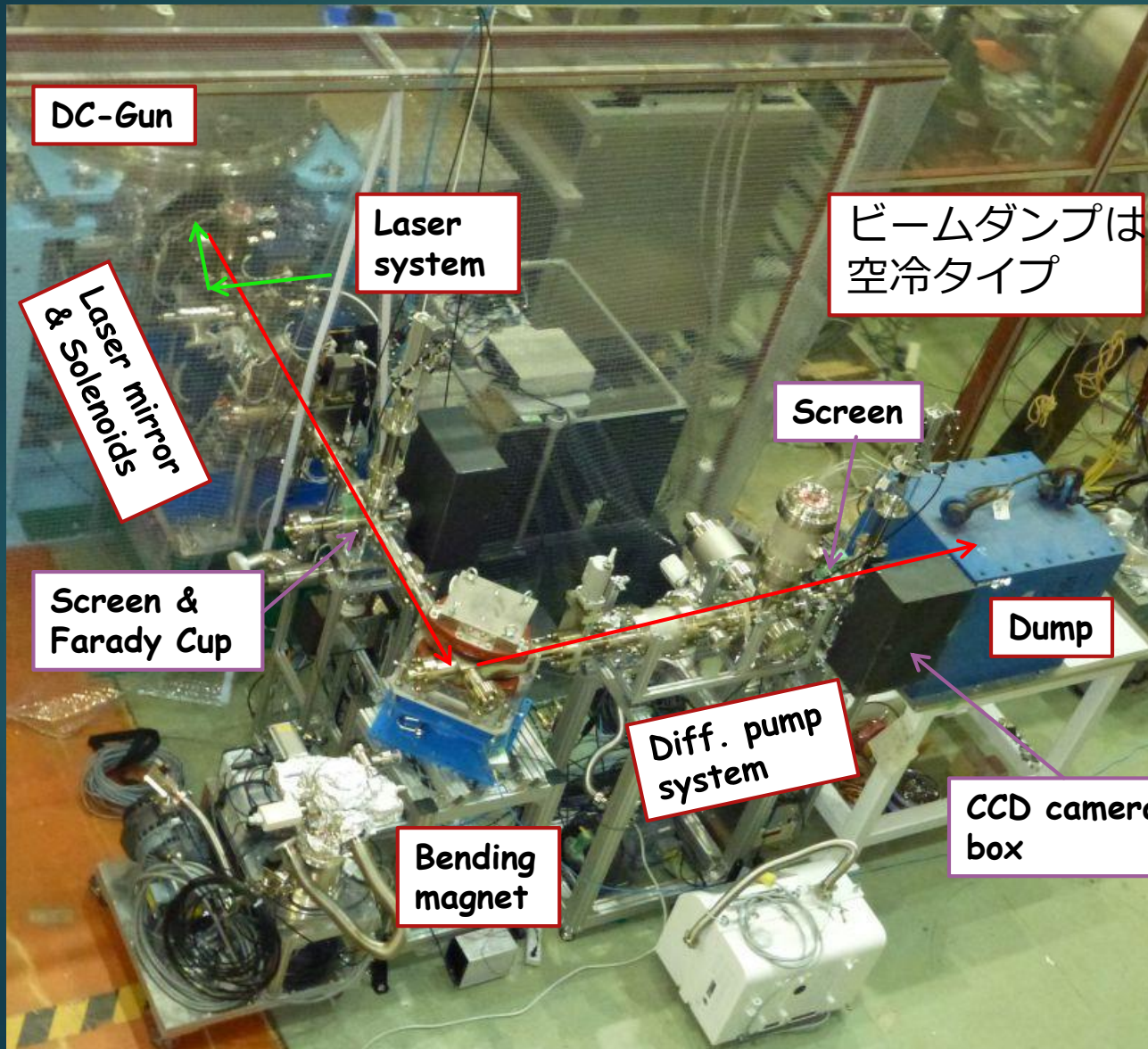


PF-AR南棟

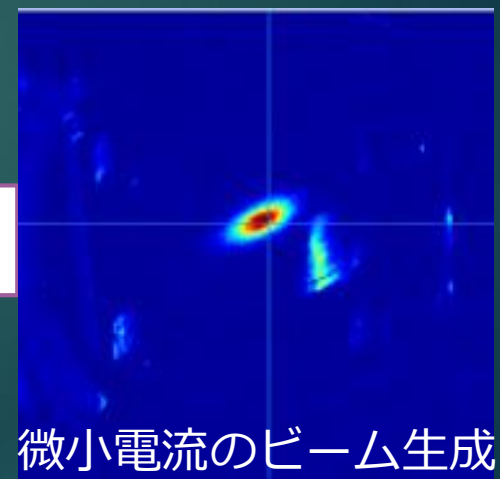


2014年10月末 PFエリアからAR南棟へ移設
2014年11~12月 電子銃と接続、再立上げ

電子銃2号機のビーム評価&ダンプライン



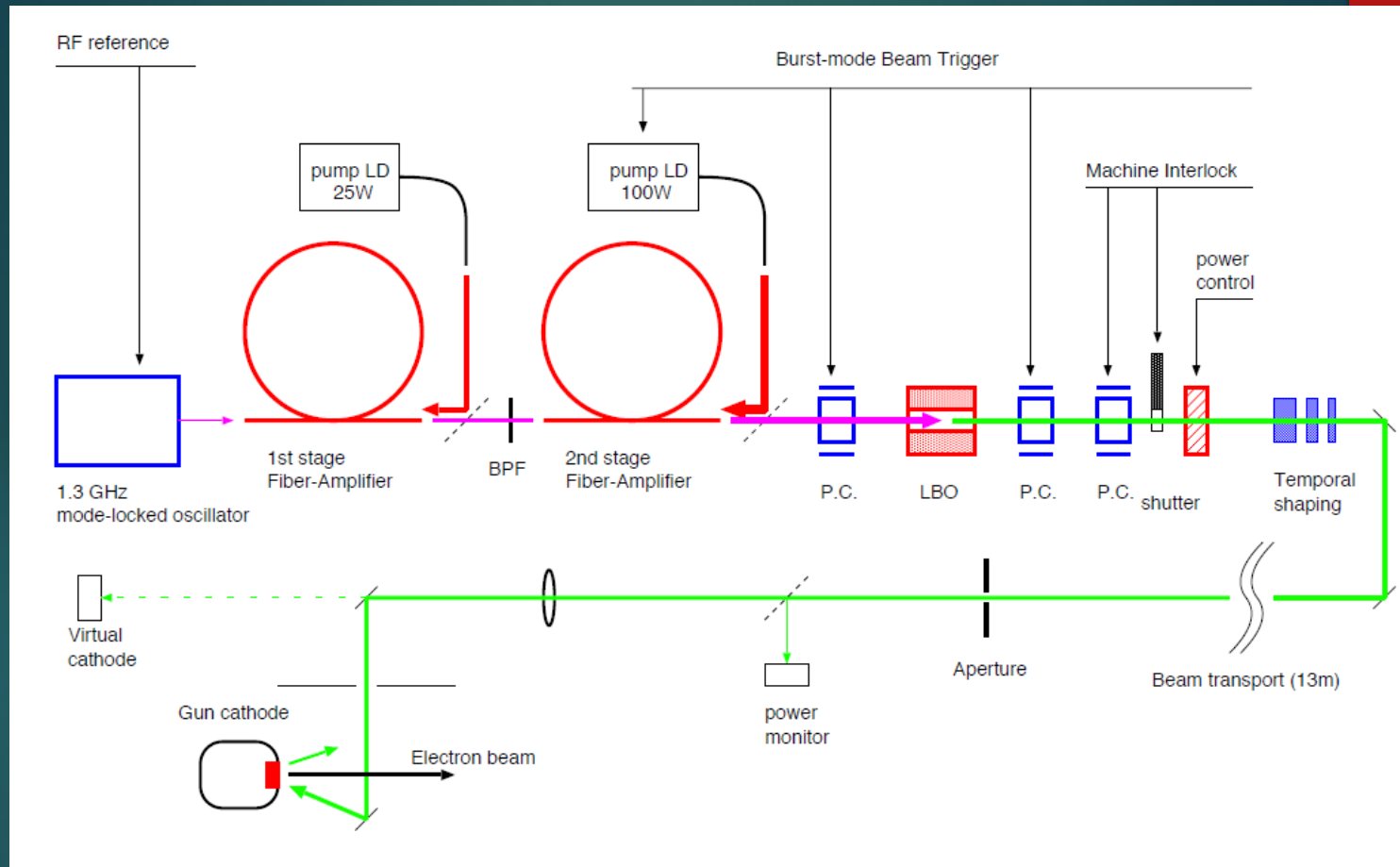
Laser system



その後、2016年にビームライン全体を厚さ10mm鉛で遮蔽。

2015年4月~

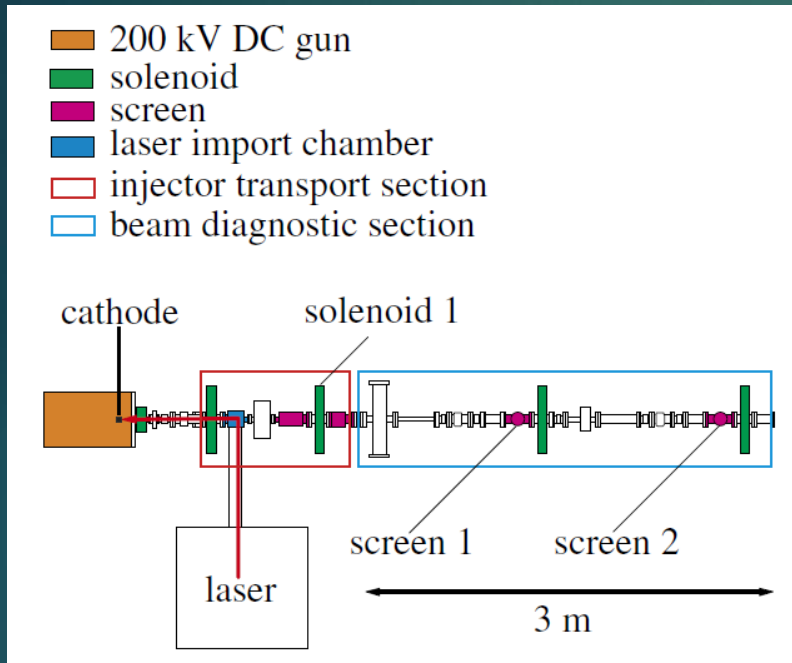
ドライブレザーシステム



- 1.3 GHz, 162.5 MHzの2システムでビーム生成。(162.5 MHzは別システム)
- 複屈折結晶によるパルス時間整形。ピンホール結像光学系でパルス空間整形。
- バーストモードとCWモードで熱負荷が異なる。
- レーザー室、光学テーブル等の温度安定化が出力安定化のために重要。

カソード評価システム

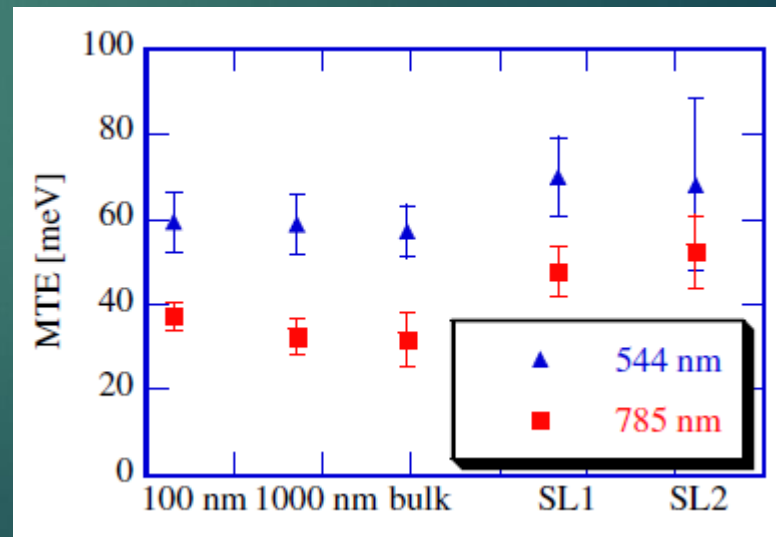
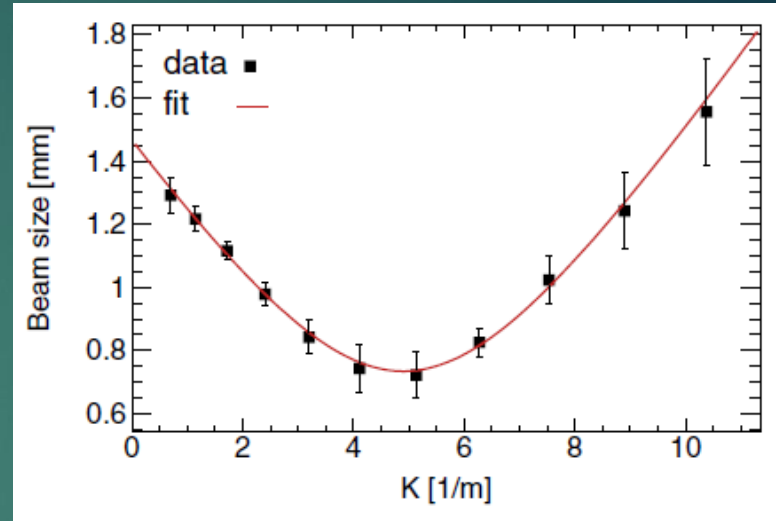
ソレノイドスキャン法によるエミッタンス評価。
S. Matsuba et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 046402 (2012).



Solenoid1を変化させ、下流の screen1と2でビームサイズを計測

Mean Transvers Energy (MTE)

$$\epsilon_{\text{nrms}} = \frac{1}{m_e c} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle} = \sigma_x \sqrt{\frac{2 \langle E_{k_x} \rangle}{m_e c^2}}$$

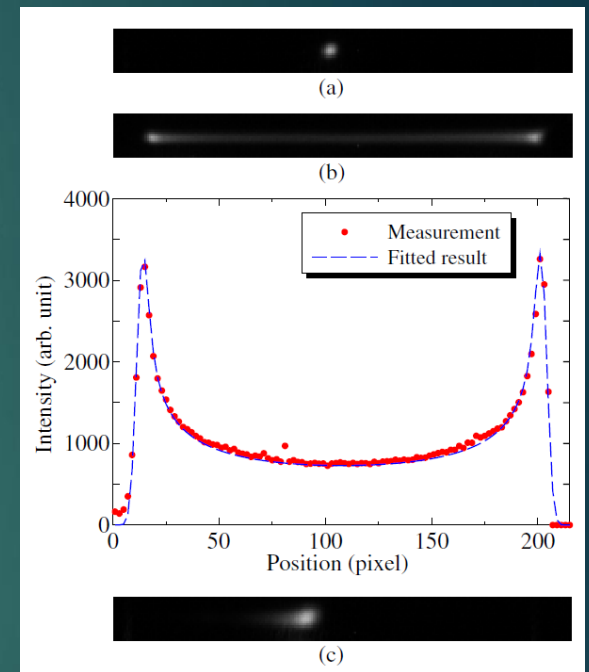
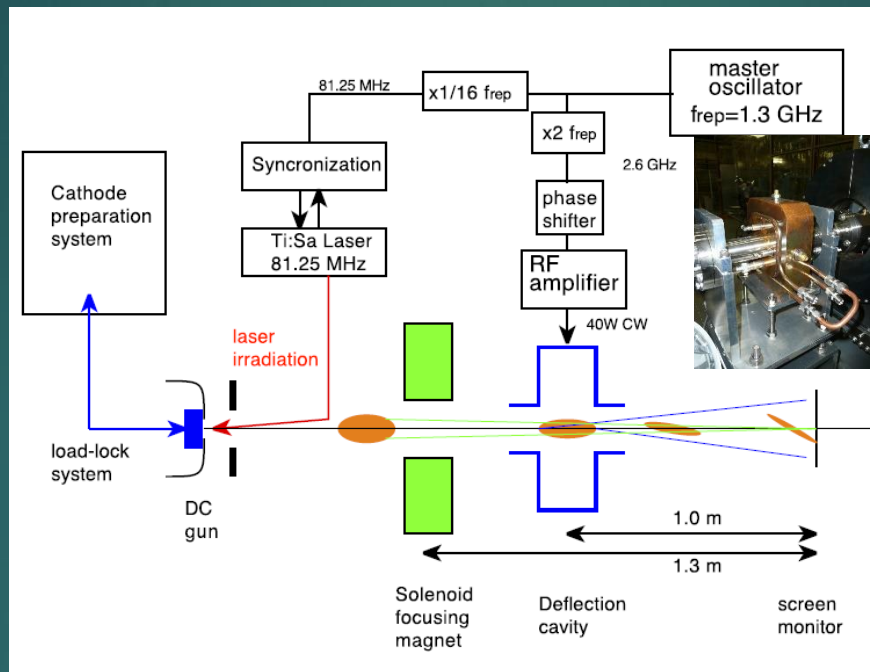
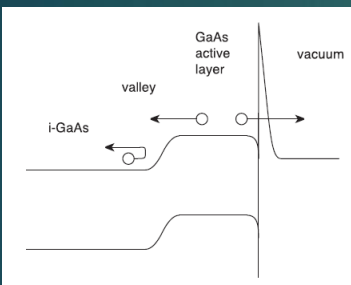
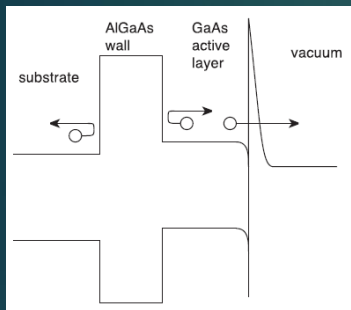


励起電子の余剰エネルギーの影響を評価

カソード応答性評価

GaAsカソードの厚さ、励起波長とバンチ長の関係を調査

Y. Honda et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52, 086401 (2013).



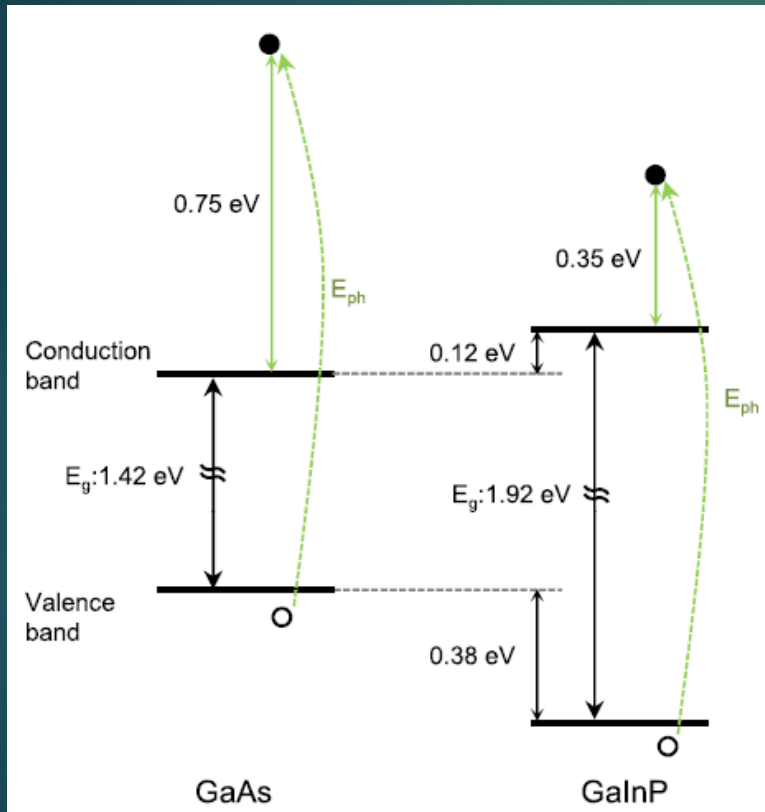
Cathode type		Wavelength 785 nm			Wavelength 850 nm		
Active layer thickness (nm)	Boundary	QE (%)	1/e (ps)	1/e ² (ps)	QE (%)	1/e (ps)	1/e ² (ps)
360	Wall	2.11	9.2	21.7	0.65	9.8	20.2
360	Valley	0.32	3.7	5.9	0.02	4.5	7.6
1200	Wall	5.00	9.2	48.5	0.86	14.7	107.3
1200	Valley	2.10	5.8	21.9	0.30	13.5	35.9
Bulk	N/A	0.14	7.1	39.1	0.03	8.8	28.1

低熱エミッタンスを求めて長波長励起を行うと非常に長いTailを引く。

半導体カソード改良の方向性

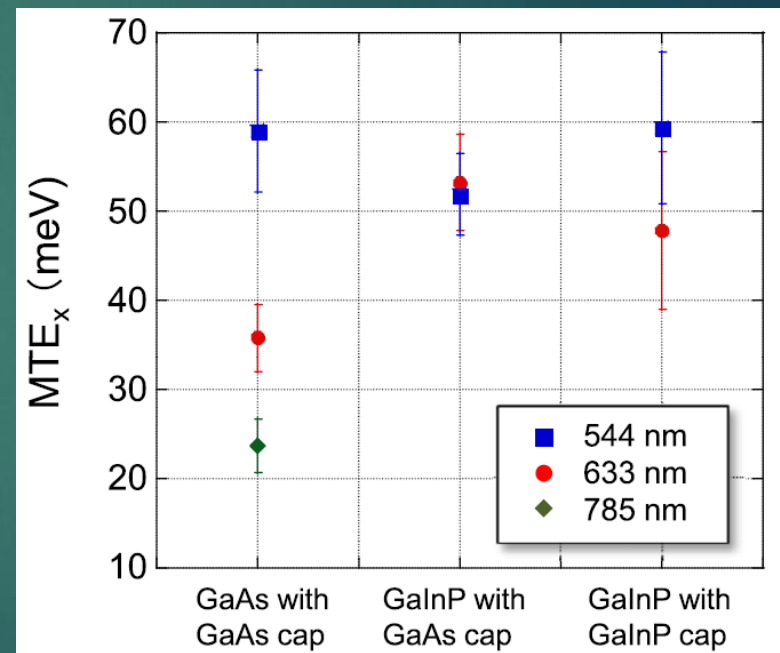
532nm励起により適した半導体カソード

X. G. Jin et al., J. Appl. Phys. 166, 064501 (2014).



GaInPはGaAsよりもバンドギャップが大きく、532nmで励起された電子が持つ余剰エネルギーが小さくなる。

Photo cathode	600 nm GaAs with GaAs cap	600 nm GaInP with GaAs cap	600 nm GaInP with GaInP cap
QE@523 nm	9%	14%	11%

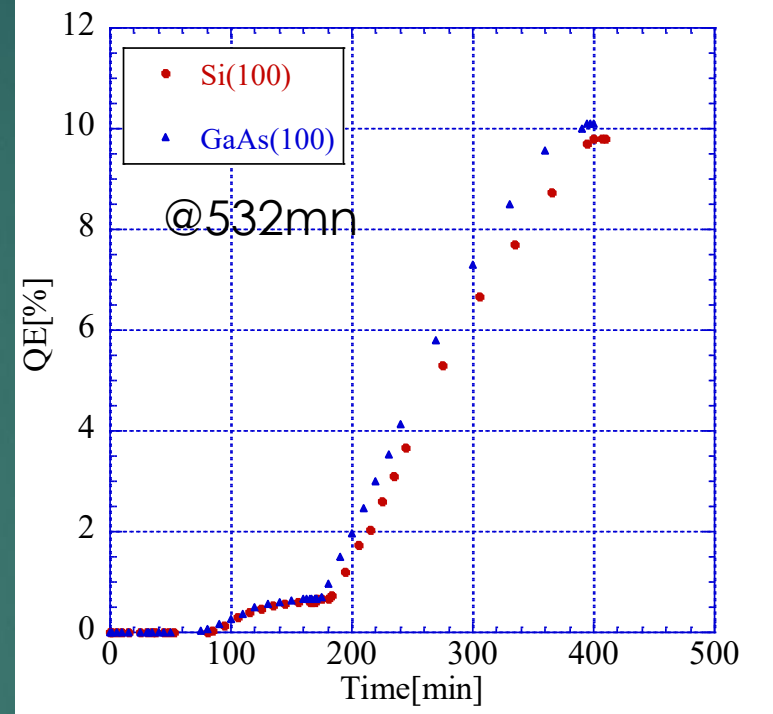
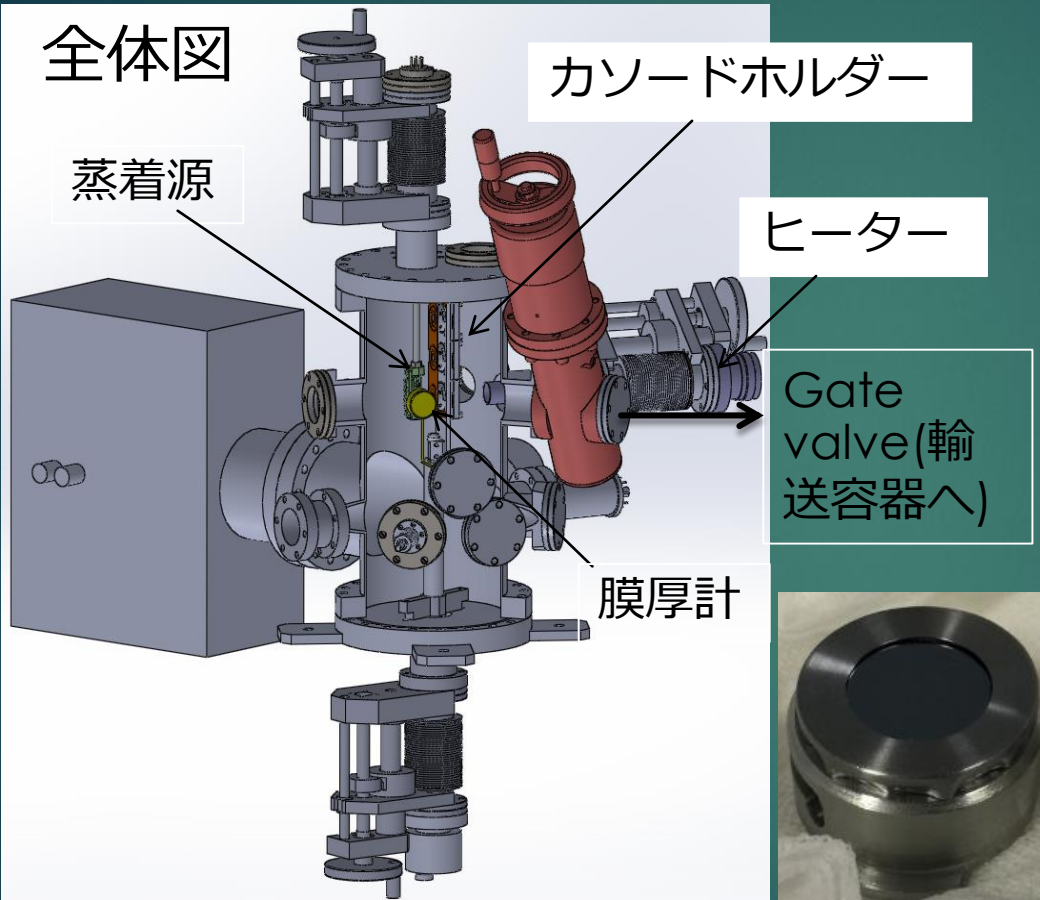


532nm励起の場合、GaAsと熱エミッタンスは同等。

CsK₂Sb カソード蒸着装置 (広島大)

半導体カソードと比べ非常に寿命の長いアルカリ金属系薄膜カソードをcEERL電子銃で利用する目的

全体図



- K蒸着中から量子効率を観測
- Cs蒸着時に大幅に上昇

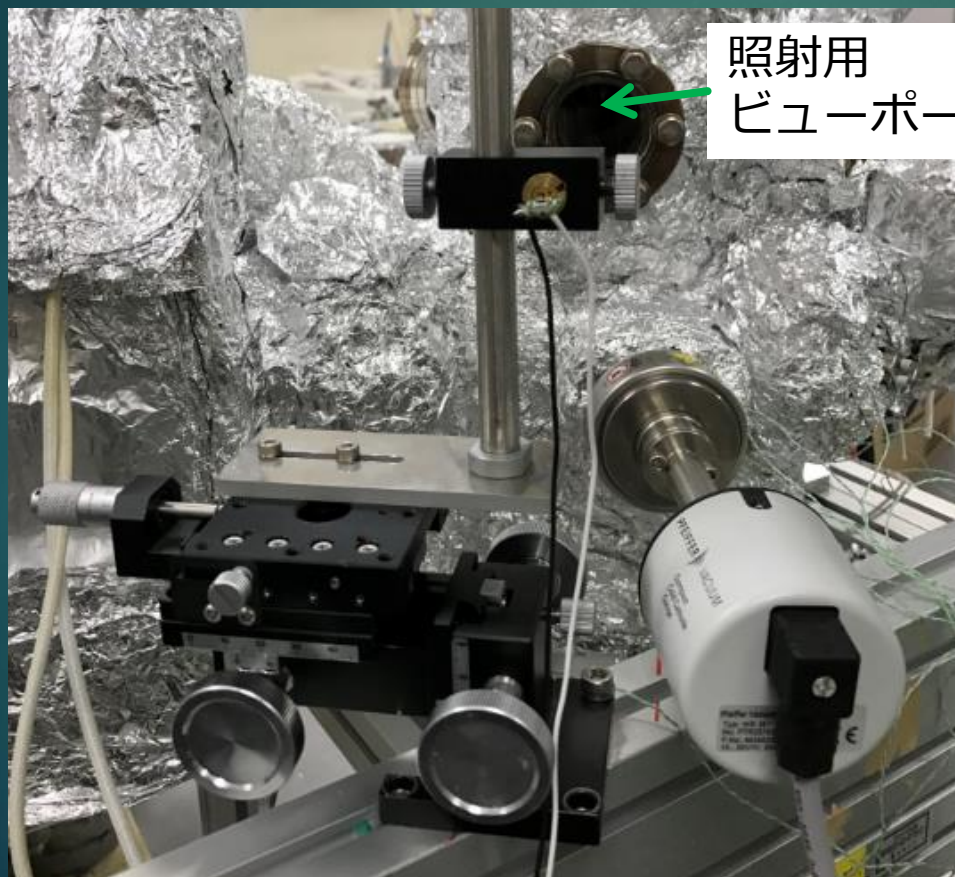
- SiとGaAs基板でQE約10%を達成 @532nm
- Cornell group[1]によって得られたQEと同様。

[1]S. Karkare, et al., Proceedings of IPAC 2013, Pasadena, CA, TUOAB1 (2013).

輸送前のCsK₂SbカソードQE分布 (@広島大)

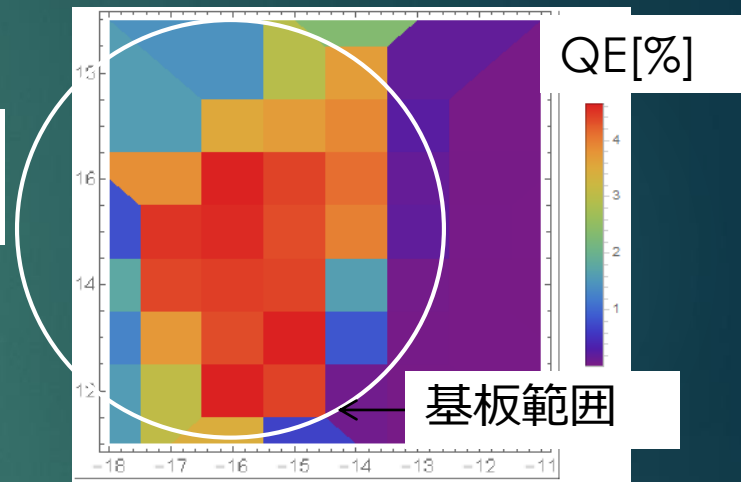
2016/12/26

- マルチアルカリ (CsK₂Sb) カソードの成膜を実施。

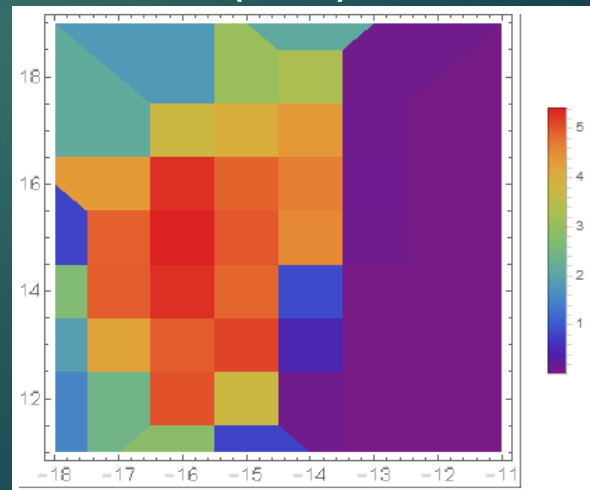


照射用
ビューポート

Si(100)基板



GaAs(100)基板



- 横と縦軸の単位はmm

Vacuum suitcase接続 (@広島大)

Vacuum suitcase
 $P < 1.0e-8Pa$

接続部分
 $P \sim 1.0e-7Pa$

蒸着装置
 $P \sim 2.0e-8Pa$

Vacuum suitcaseは
KEKにて開発

輸送前の予備試験

Vacuum suitcase内部で約3週間保存後に蒸着装置へ戻し
QEを測定。ほぼ同じQEであることを確認。

Vacuum suitcase輸送 & 接続 (@KEK)

2017/1/16

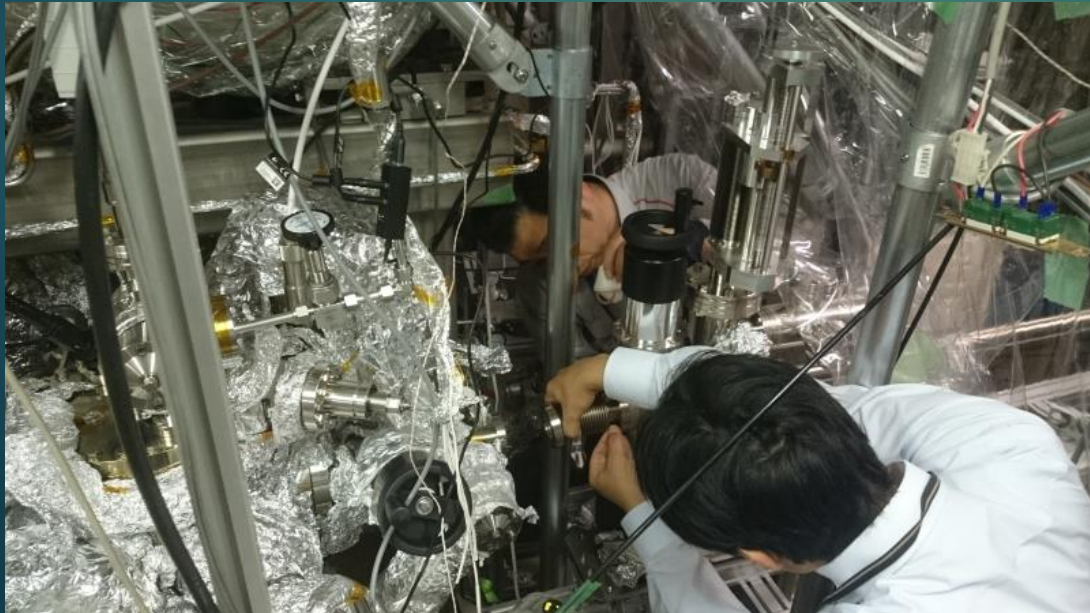
- Vacuum suitcaseがKEKに到着。

2017/2/7

- Vacuum suitcaseの接続用架台の設置。

2017/2/14

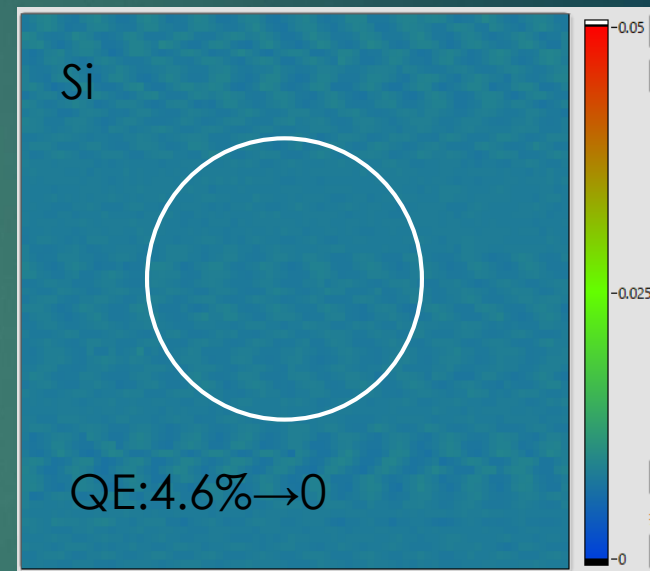
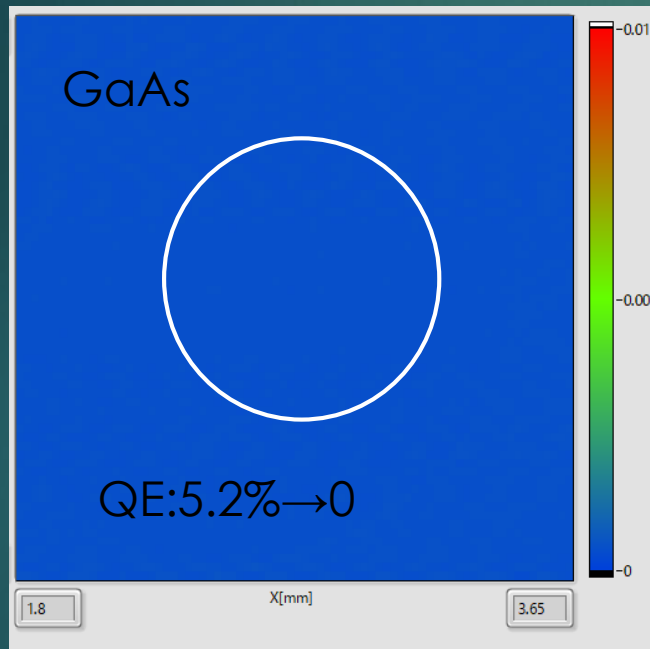
- 接続部は約10時間ベーキング。
- ベーキング中のVSCの圧力上昇は 1×10^{-7} Pa以下。
- 接続部の到達圧力は約 1×10^{-8} Pa。



輸送後のCsK₂SbカソードQE分布 (@KEK)

2017/2/21

- ・マルチアルカリカソードをcERL電子銃カソード準備系へ輸送。



- ・輸送した2つのカソードのQEは完全に0%。
- ・輸送中の振動でトランスファロッド等からのアウトガスの影響の可能性。
- ・振動センサー、真空を常時モニターするロガーを使った調査を試みる。

まとめ（その1）

【電子銃1号機および入射部】

- ・ 加速電圧500kVの安定印可に成功。
- ・ 単独試験(@JAEA)では500kV,1.8mAを実証。
- ・ cERL運転では電子銃より1mA相当のCWビーム供給。QEは1~2%相当で安定。
(繰り返し1.3 GHz & 162.5 MHz, バンチ電荷最大~5.5 pC/bunch)
- ・ 放電閾電圧を発見。長期安定に印可できる電圧が実験的に明確化。

【明らかになった問題点と対策】

1. 高圧電源出力の問題
コッククロフト回路へ電力を供給するためのインバーター電源改造（予定）。
2. Laser導入ミラーのチャージアップ問題
チャージアップしない全金属ミラー採用で解決。
3. CW運転時のカソードイオン衝撃問題
イオン衝撃範囲から離れた位置よりビーム生成で影響を抑制。
4. カソード固定状態と暗電流発生の問題
カソードプラグの固定状態で低電圧から暗電流が発生することを確認。
5. スクリーンのチャージアップ問題
バーストパルス幅を縮め、総電荷量を50nC以下とすることで抑制可能。
6. 入射空洞暗電流問題
電子銃位置で検出される入射空洞FE由来の放射線が無い状況の運転で解決。

まとめ（その2）

【電子銃2号機】

- ・ 加速電圧500kVの安定印可を実証。
- ・ カソード表面最大加速電界6.9 MV/m(@500kV)。
- ・ 極高真空 4×10^{-10} Paを定常的に実現。
- ・ 複数のGaAsカソードの同時活性化を実証。
- ・ 微小ビーム電流での試験を開始。

【ドライブレザー】

- ・ バースト&CWモード、162.5 MHzと1.3 GHz繰返し、空間&時間整形実施。
- ・ 大出力（大電流CWビーム運転）時の共振器周りの温度安定化の対策は必要。

【半導体カソード】

- ・ 200kV電子銃とビーム診断系を利用したエミッタンスと応答性評価を実施。
- ・ GaInPカソードの提案

【マルチアルカリ(CsK₂Sb)カソード】

- ・ 広島大、JAEAで成膜試験が実施。
- ・ 成膜条件を確立し、成膜直後で10%程度のQE(@532nm)達成。
- ・ 広島大で成膜されたカソードをVacuum suitcaseでKEKへ輸送。
- ・ cERL電子銃カソード準備系で測定したQEは0%。
- ・ 次の輸送を計画中。輸送時のデータから原因調査が必要。

最後に

ERLの開発は失敗したかのようなレッテルを貼られていますが、電子銃1号機(cERL電子銃)、2号機はそれまでCornell大、JLAB、Daresbury...などで実現できなかった500 kVの壁を突破しました。

また、ERLに対する批判として電子銃のカソード寿命問題をいつも指摘されて来ましたが、実際にやってみると脆弱な半導体カソードでも1mA CW運転では数時間程度ですがQEの明確な低下は観測困難な状況です。（そうなるよう装置開発に努力してきたつもりです。）

少なくとも次のステップとなる10mA級のcERLでのCW運転試験を行い、真に実用に耐えうるものかどうかを判断できる機会を与えてほしい。