

# 超高真空中の直流電界ギャップの 放電に関する実験&現象の考察

第98回ERL検討会

2016年7月4日

報告:山本将博

ここで述べる内容の主要な部分は、6/22(水)付でAPLにacceptされた論文  
“High voltage threshold for stable operation in a dc electron gun”  
に記載されている内容です。(著者:山本 将博、西森 信行 氏)

# Outline

## 1. 背景

- ・これまでの放電の実験的結果と疑問

## 2. 放電メカニズム理解の手がかりとその解釈

- ・2次荷電粒子、電子刺激脱離(ESD)
- ・放電電圧上昇メカニズムの解釈

## 3. 実験結果

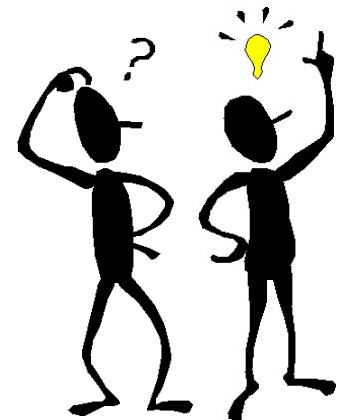
- ・cERL電子銃エージング結果とそれが示す意味

## 4. 放電現象の考察

- ・文献からの推定値と実験結果からのESD起因イオン発生量の推定

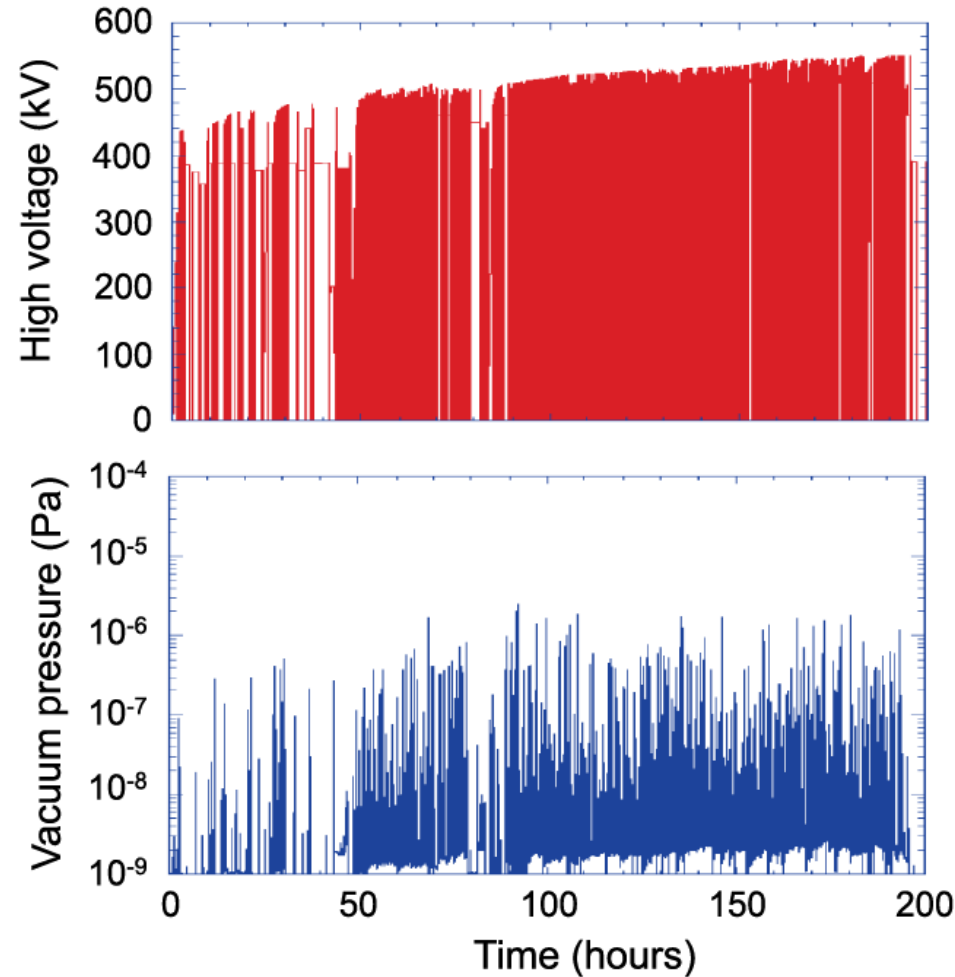
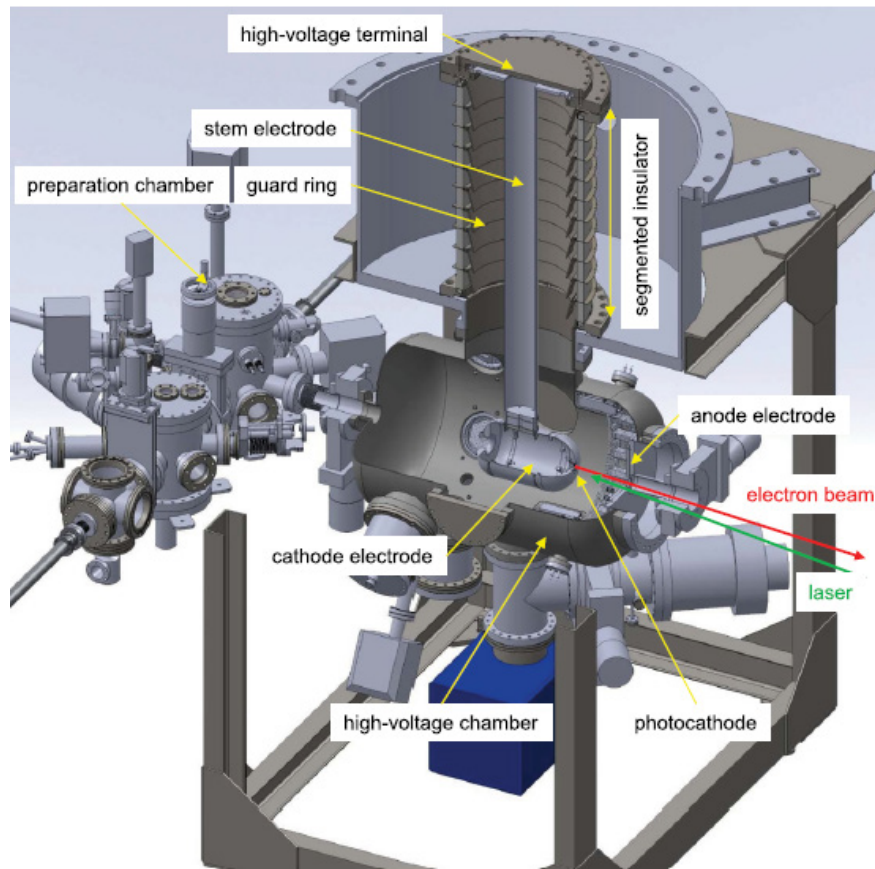
## 5. まとめ

## 6. 謝辞



# 背景：cERL電子銃とエージング結果の一例

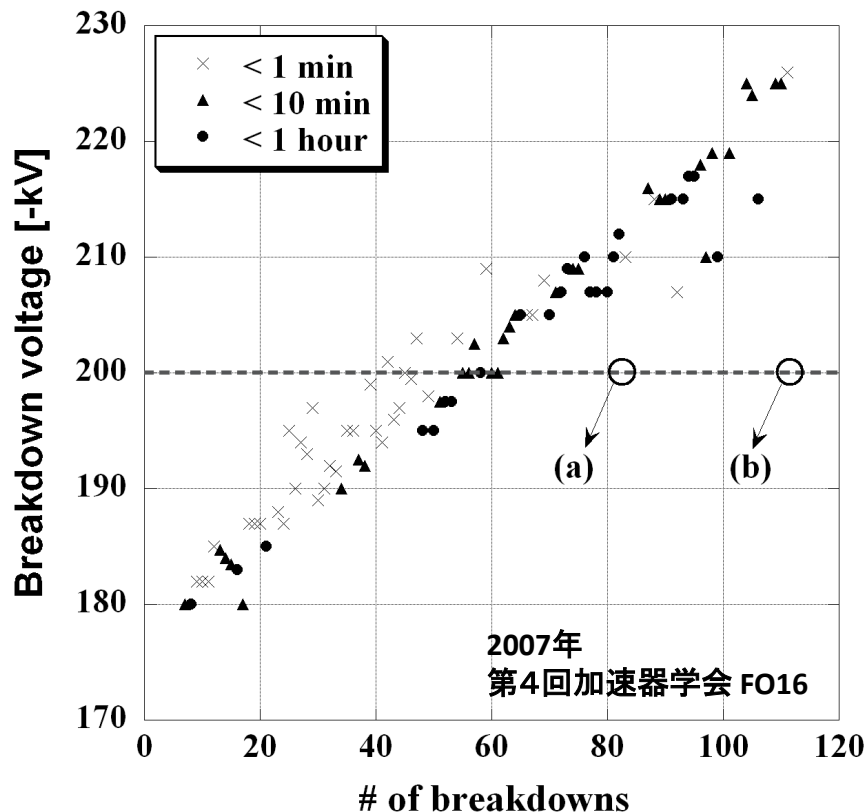
N. Nishimori et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 17 (2014) 053401.



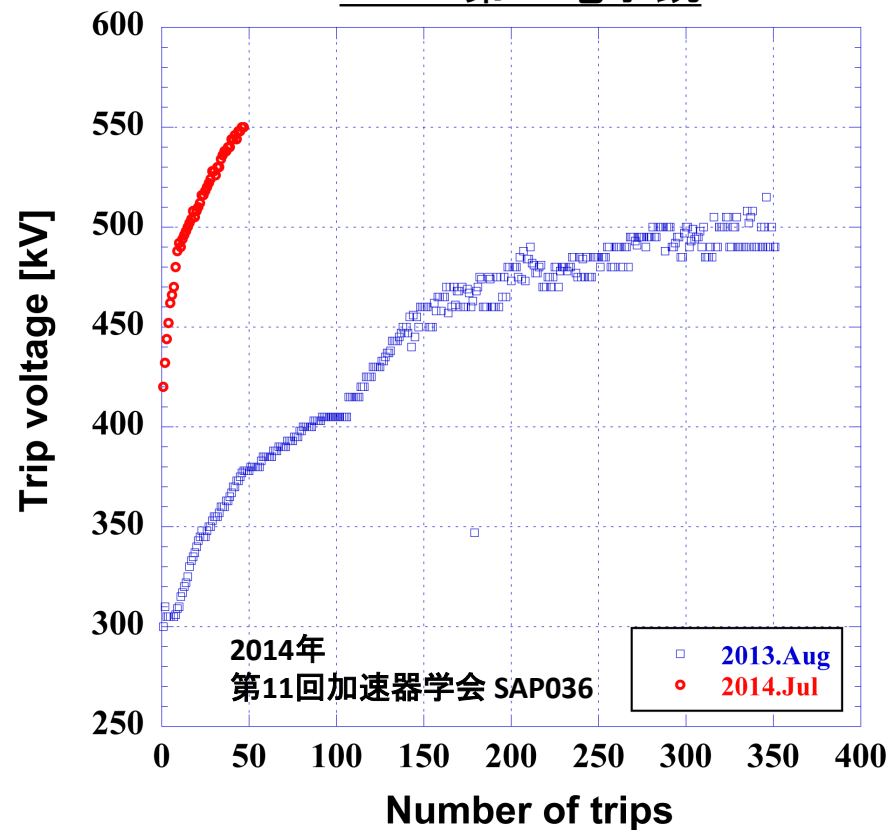
- Base pressureは $1\text{E-}9$  Pa相当。
- 微小放電を多数回繰り返して保持できる電圧を徐々に上げる。

# 背景: cERL電子銃以外のDC電子銃エージング履歴

## 200kV偏極電子銃



## 500kV第二電子銃



エージングの特徴的な傾向として、(経験的にチタン電極、モリブデン電極に限られているが)

1. 初期の電界放出暗電流がほとんど流れていない。
2. 放電は一瞬発生して終わる。(持続放電ではない)
3. 放電電圧の上昇は連続的。(放電電圧の記憶効果)

# これまでの定説(?)で理解を試みる

## 1. 陰極上の微小突起からの電界放出&蒸発で説明できるか？

- ・数nAレベルの暗電流から蒸発に至る微小突起
- ・微小突起の形状が放電毎に少しずつ変化する必要がある。  
放電電圧が連続的に上昇する傾向について説明困難。

## 2. 電極に付着している微粒子の帯電&加速衝撃(クランプ説)では？

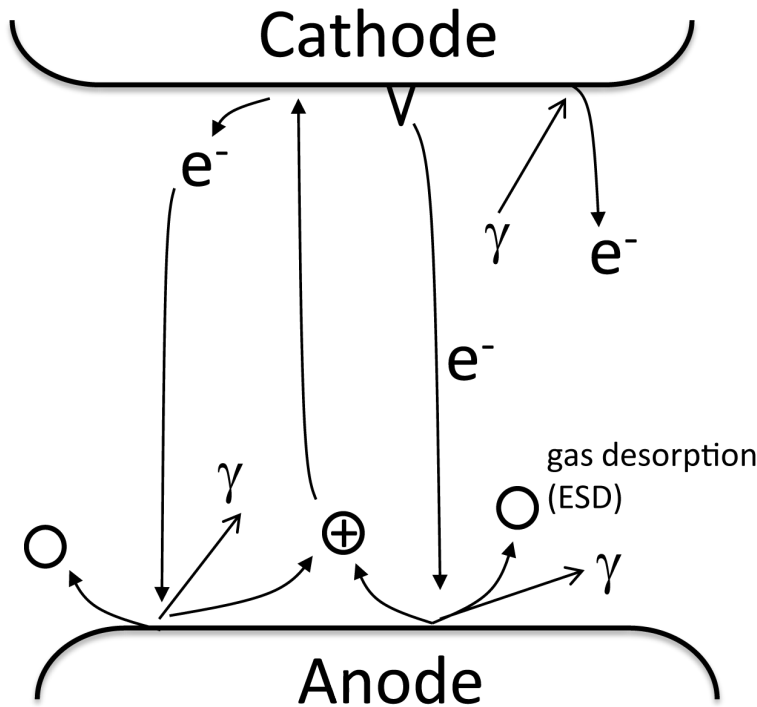
- ・暗電流の発生が無い状況で放電に至る現象は説明できる。
- ・放電毎に連続的に放電電圧が上昇する過程の説明には  
微粒子のサイズ分布の傾向が決まっている前提が必要。

どちらの場合も不自然な条件や仮定が必要。  
もっと腑に落ちる物理的な背景があるのではいだろうか。



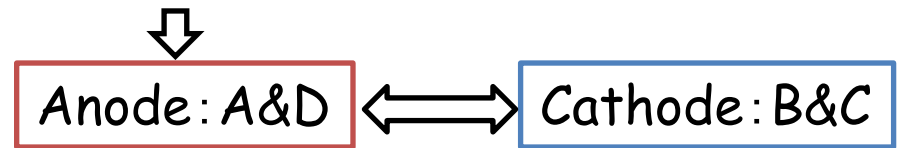
## 2.放電メカニズム理解の手がかりとその解釈

# 超高真空下での放電回路



電界放出源の蒸発以外でDC電界の放電には陽極からのイオン、photonの関与があるはず。

種: 電界放出等による微量な電子放出



$(A \times B + C \times D) > 1$  : 放電発生

$(A \times B + C \times D) < 1$  : 放電終息

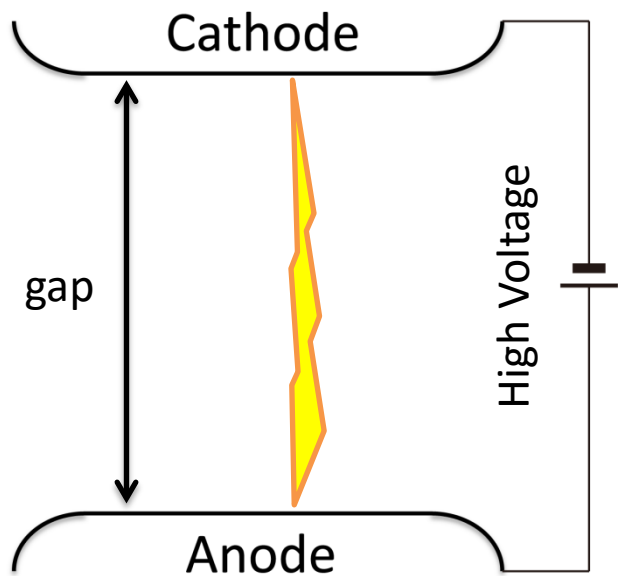
## 超高真空下の放電回路の4要素

- A: 電子刺激によるイオン放出
- B: イオン刺激による2次電子放出
- C: X線刺激による2次電子放出
- D: 電子衝撃による制動・特性X線放出

真空Gap間の放電について、電子刺激脱離 (ESD) や光刺激脱離 (PSD) 起因で発生するイオンが放電に関与する説はあってもそれを示す直接的な実験データの報告はこれまでにほとんど無い。(個人的調査の範囲で。)

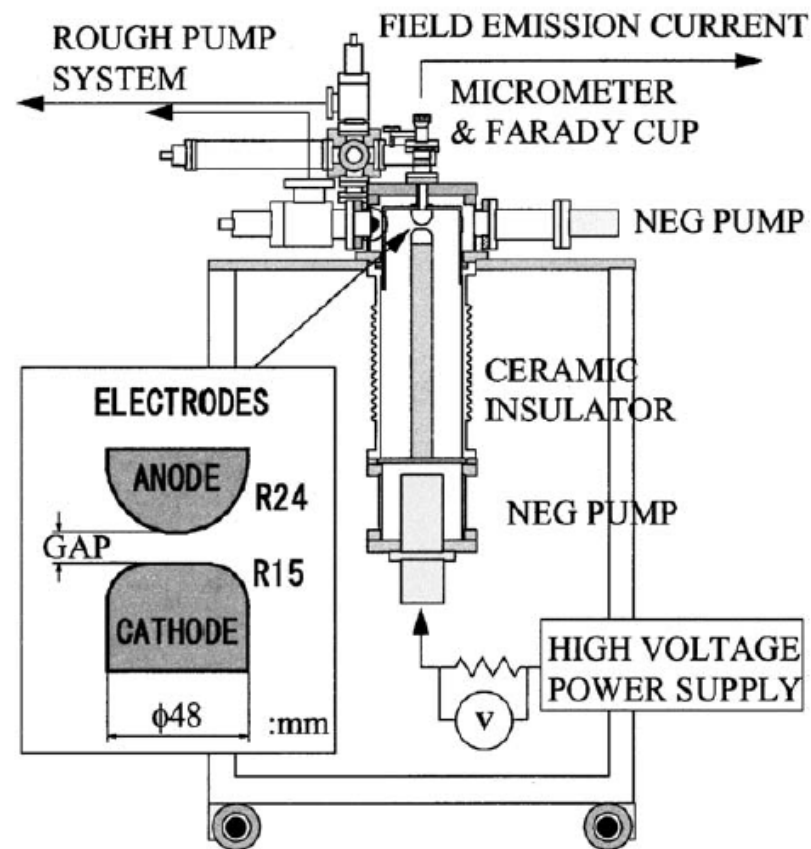
# Hint-1: 超高真空 & 直流電界ギャップの電界放出に関する基礎研究

F. Furuta et al., NIM-A 538 (2005) 33.



電界放出の式では暗電流は電界のみに依存

$$I = \frac{e^3 F^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m} \phi^{3/2}}{3eh F}\right)$$

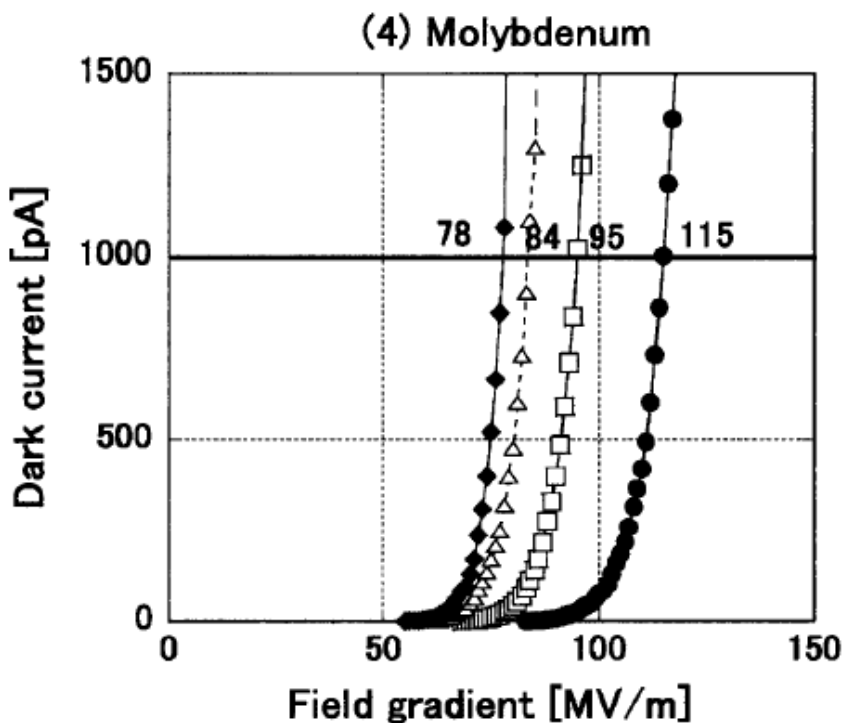


種々の金属、異なる表面処理条件に対して電界放出暗電流の測定を実施。  
電界放出現象の本質的な性質を探る。(名古屋大-KEKの共同研究)

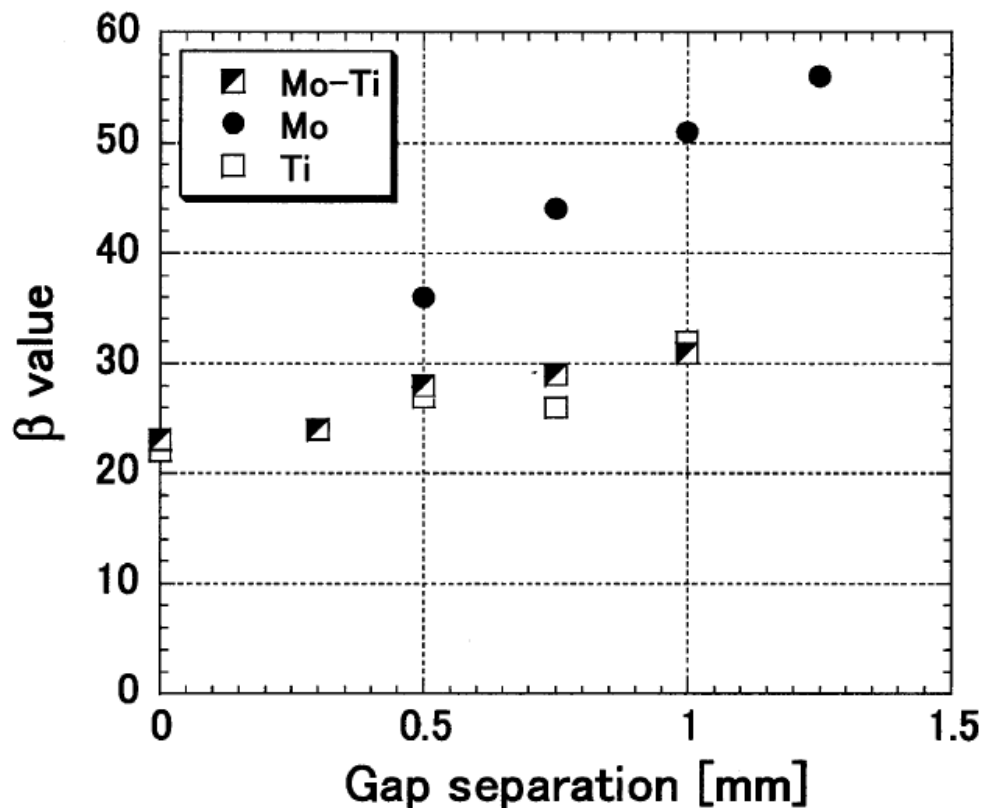


# Hint-1: 超高真空 & 直流電界ギャップの電界放出に関する基礎研究

F. Furuta et al., NIM-A 538 (2005) 33.

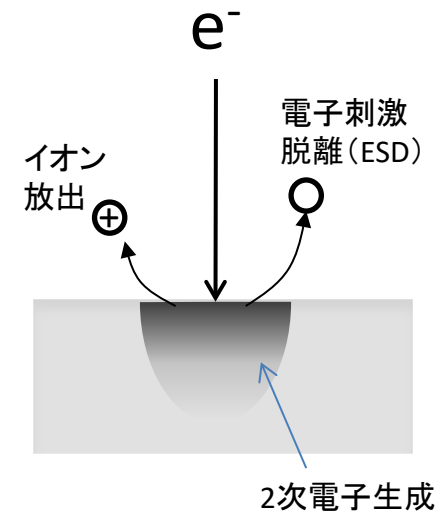
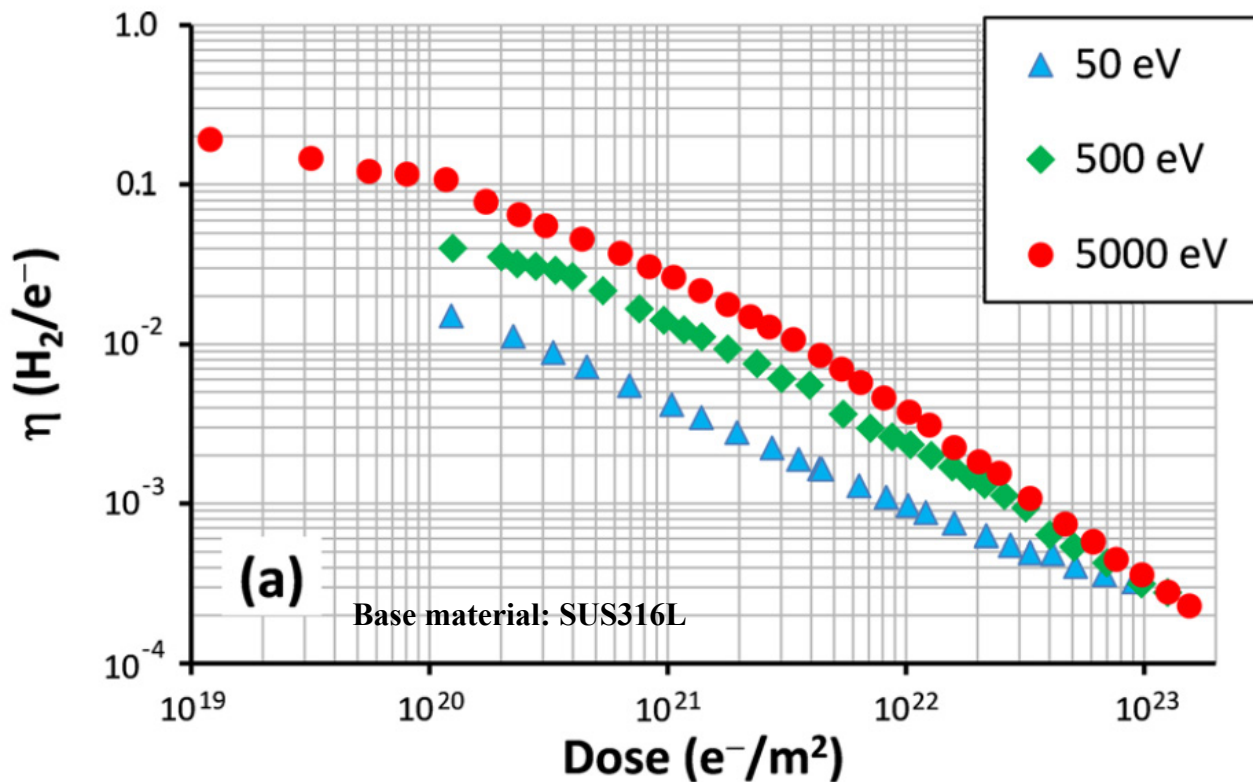


ギャップを変えたときの暗電流測定結果の一例



- ・ギャップが大きい一般的な構造では、暗電流の大部分は2次的に生成される荷電粒子が主要。(Total voltage effectも2次的荷電粒子の関与で理解できる。)
- ・放電現象でも2次荷電粒子が鍵を握っていることに確信を持つことができたデータ。

## Hint-2: 電子刺激脱離 (ESD) とそのエネルギー依存性

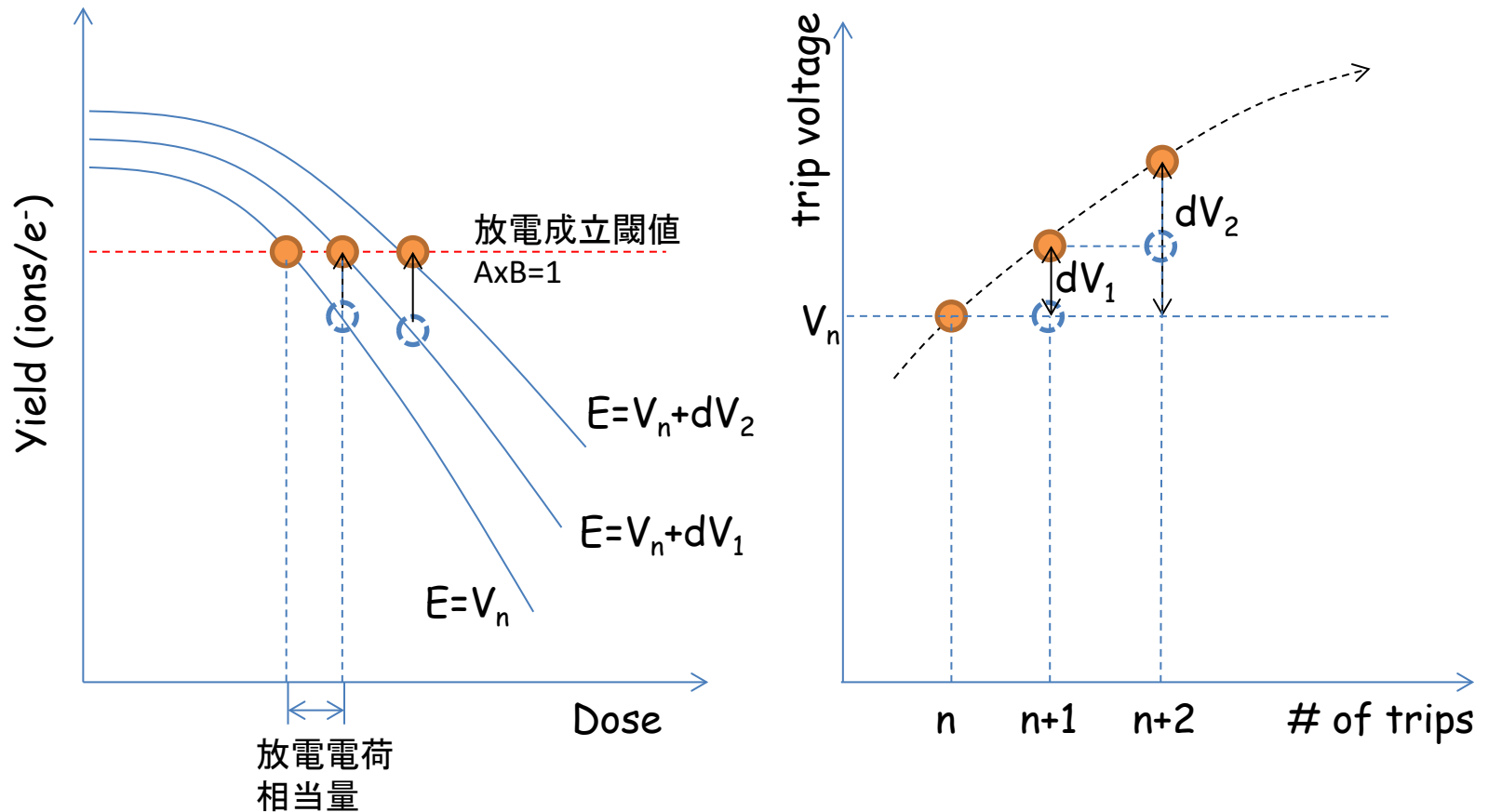


Oleg B. Malyshev et al., J. Vac. Sci. Technol. A 31 (2013) 031601

電子刺激脱離で放出される分子のうち、ある割合で正イオンが発生する場合、それまでの放電履歴 (Dose) に従って放電条件が成立する電圧が徐々に変化するはず。



# 放電電圧の記憶メカニズムの解釈

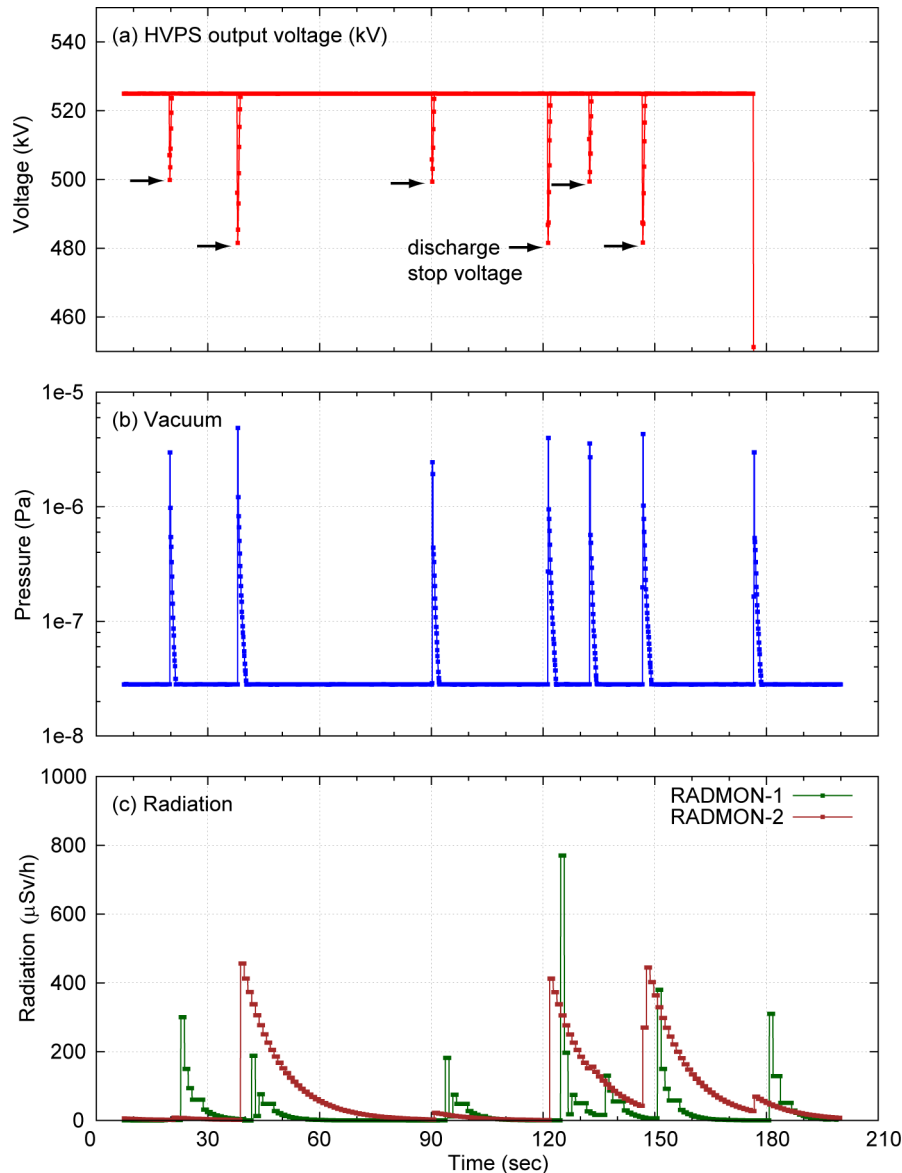


放電毎に放電電圧が徐々に上昇する現象を無理なく理解できるモデル。

# 3.実験結果

2015年11月26日～12月20日  
電子銃エージングの結果

# エージング中の電圧・真空・放射線の変化



放電発生時、

- ・電圧降下後、ITLKレベル以下であれば設定電圧まで復帰。
- ・電圧降下時の極小値→放電停止電圧。

- ・真空はTMP排気口で測定。  
応答性の早い電離真空計(Piffer PBR260)を利用。ただし測定下限が $2.8\text{E}-8$  Pa。
- ・2か所で放射線をモニター。  
電離箱(電子銃直下)  
半導体(電子銃側面)

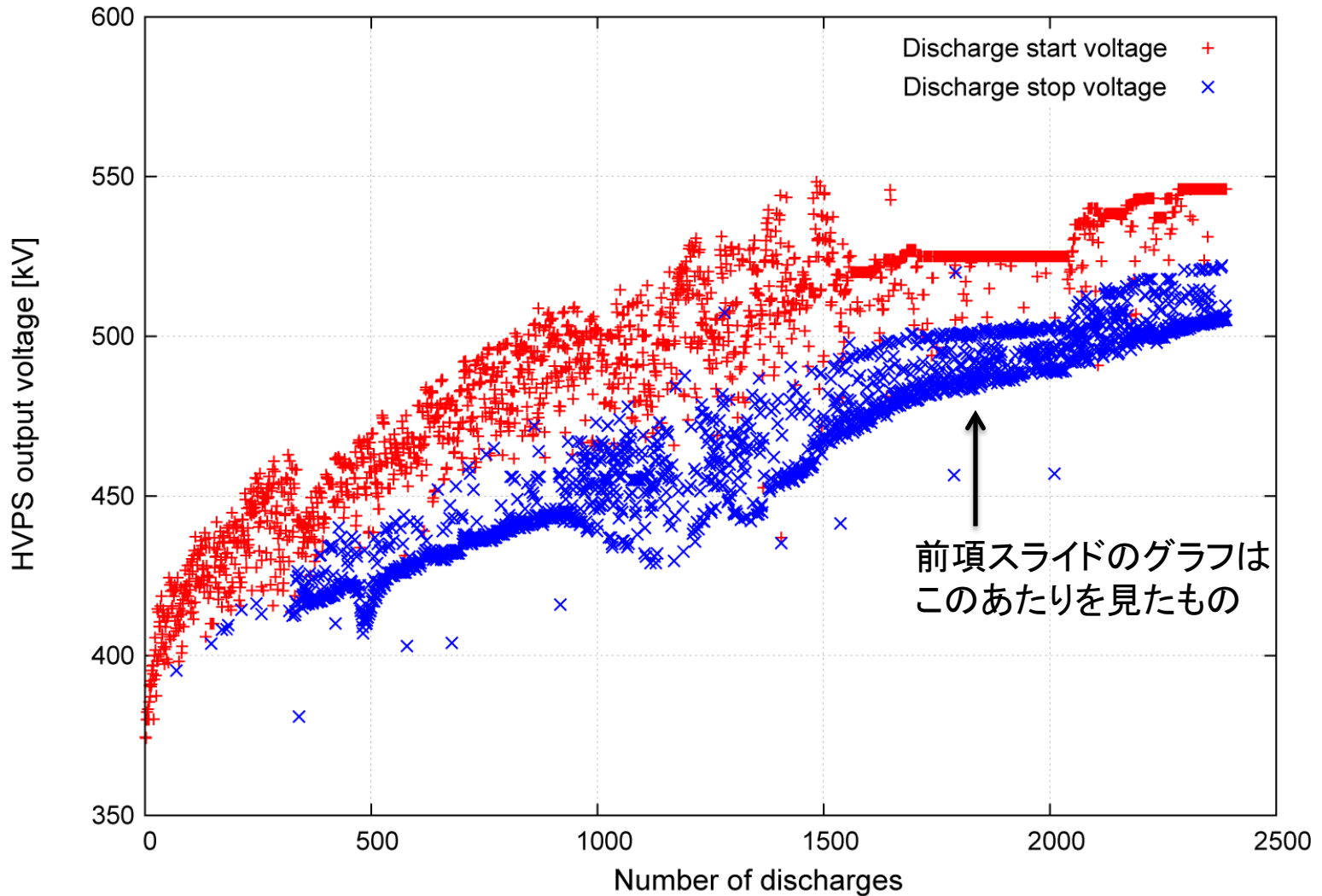
左のグラフから読み取れることは、

- ✓放電停止電圧が500kV, 480kVあたりの2パターン存在。
- ✓停止電圧500kVの時は常にRadmon2の値がほとんど跳ねない。



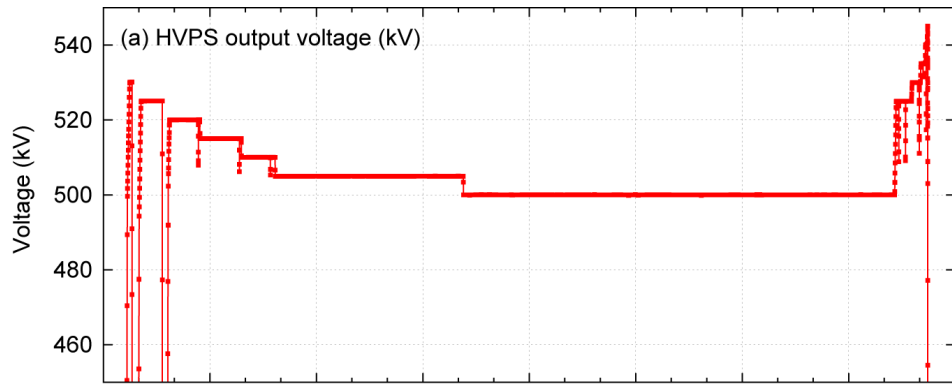
少なくとも2つの異なる場所の放電と推測

# 放電開始電圧・放電停止電圧のプロット



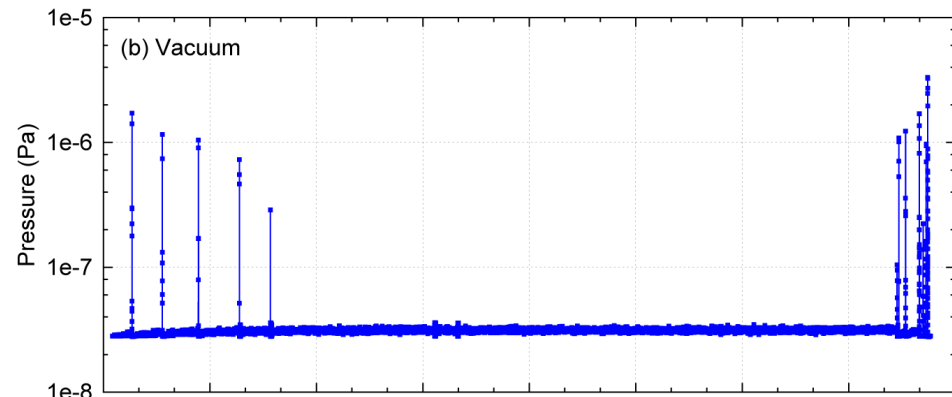
放電停止電圧も放電を繰り返すごとに上昇している。  
放電停止電圧を知ることは何の役に立つのか？

# エージング後のHV保持試験



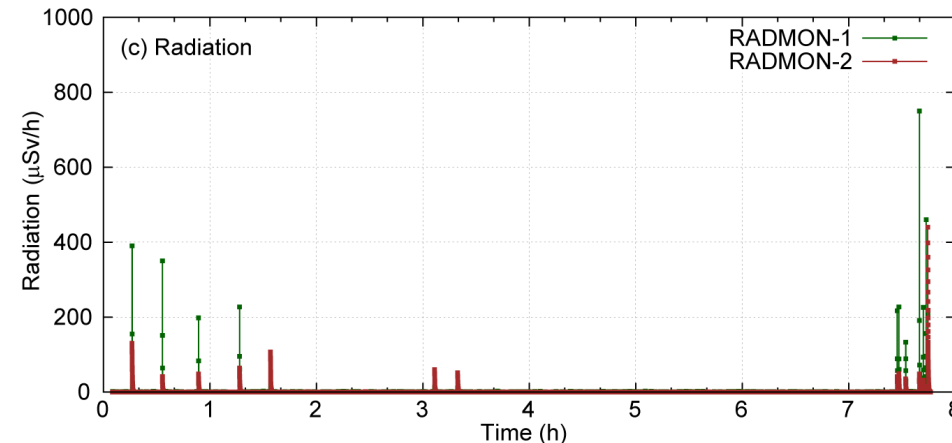
放電停止電圧が約505kVまで上昇後に高電圧保持試験を実施。

505kV以上で放電が発生。  
500kVでは4時間保持で放電無し。



放電停止電圧は放電成立条件の閾値を与えていることを示した実験的な証拠。

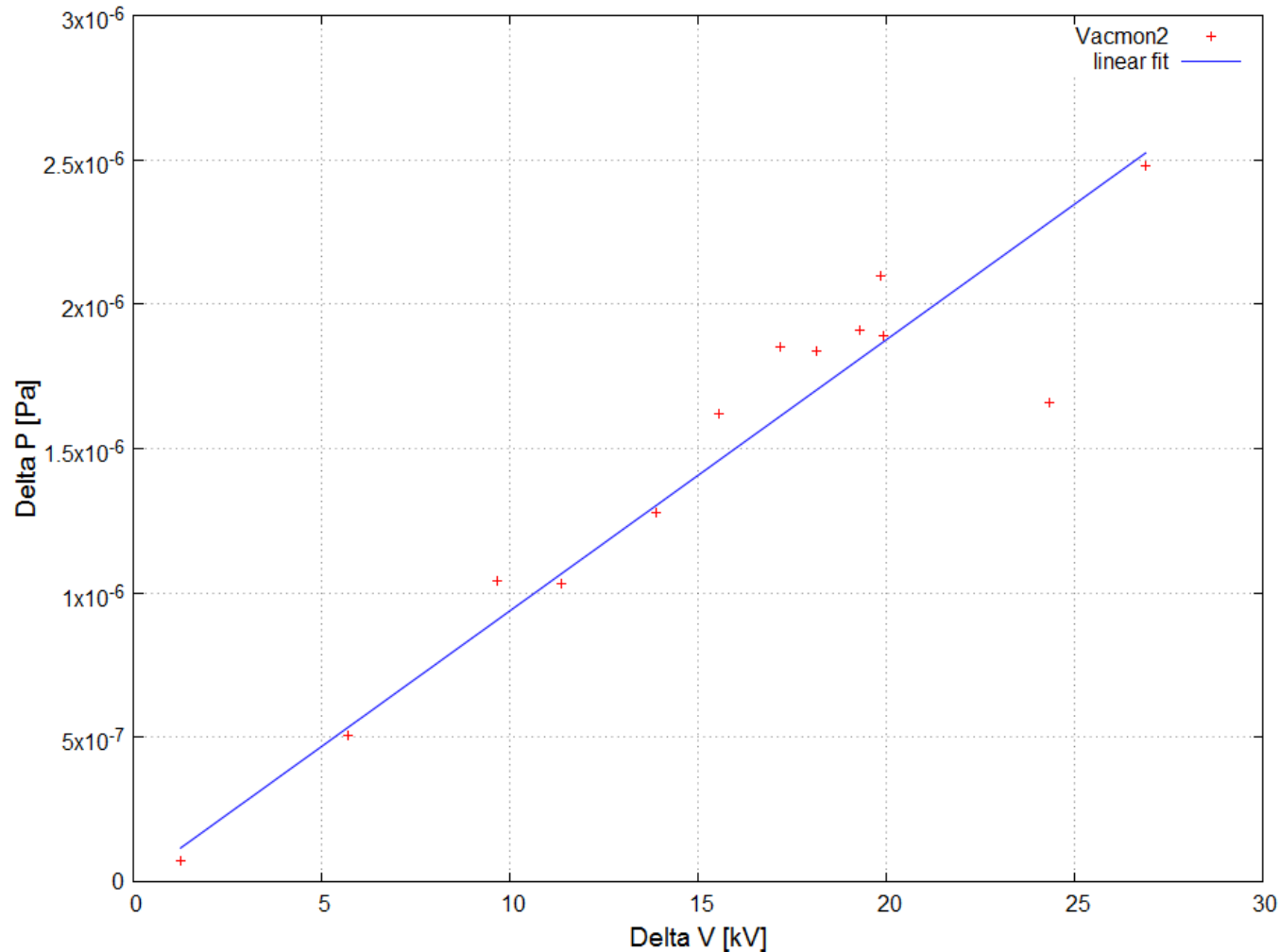
電子銃の運転電圧を放電停止電圧以下とすれば長期的に放電を起こさず高電圧を印可できる。



では放電とESDの関係性がある証拠は？



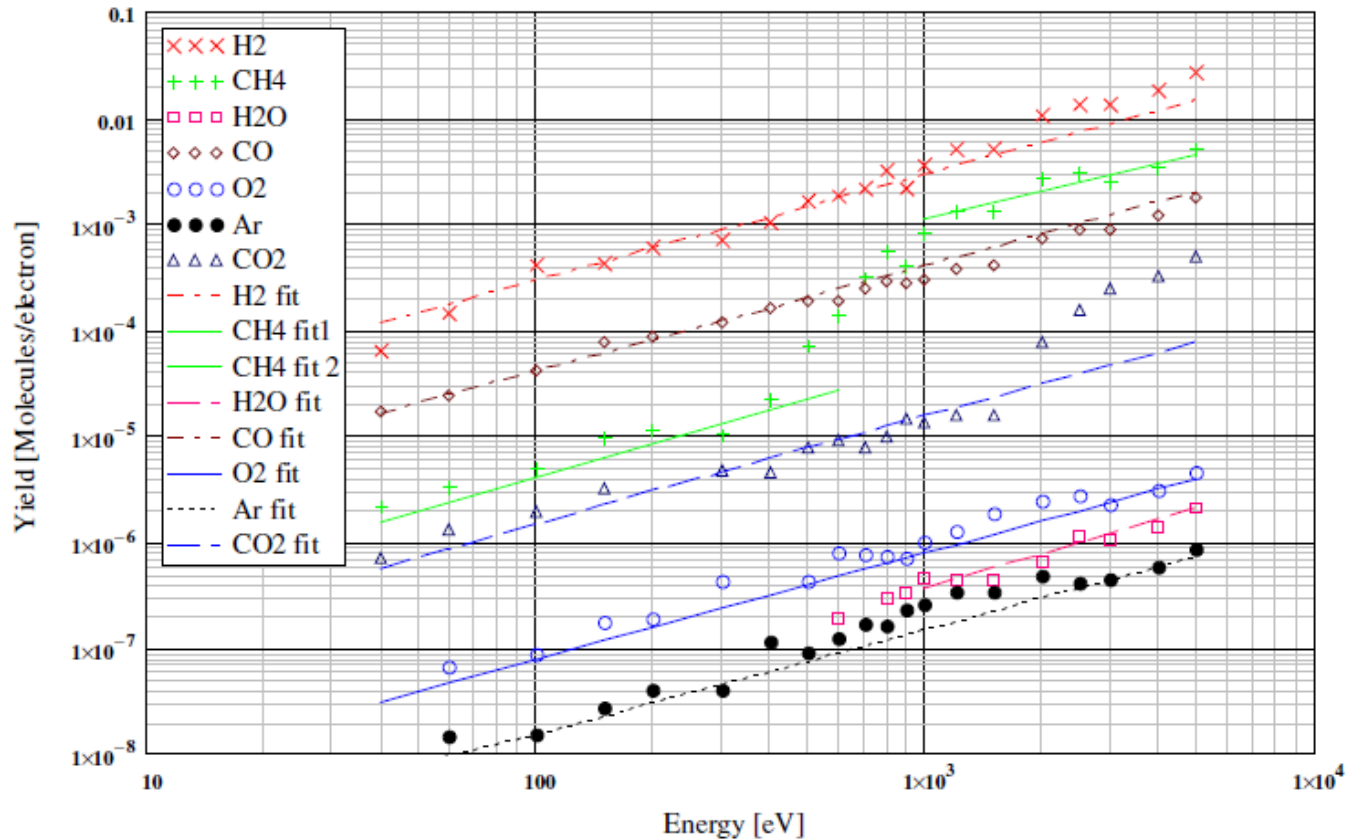
# 放電電荷量とESDの関係



- ・ $\Delta P$ と $\Delta V$ の間には比例関係があり、 $\Delta V$ は放電時の電荷量(電子数)に比例することから、グラフの傾きはESDのyieldにほぼ対応する( $V \gg \Delta V$ )。
- ・放電とESDの間には明確な関係性があることを示す証拠。



# 文献値からの推測(1)



O.B.Malyshev et al., Vacuum 85 (2011) 1063

✓ ESD yieldのエネルギーに対する変化はほぼ比例の関係。

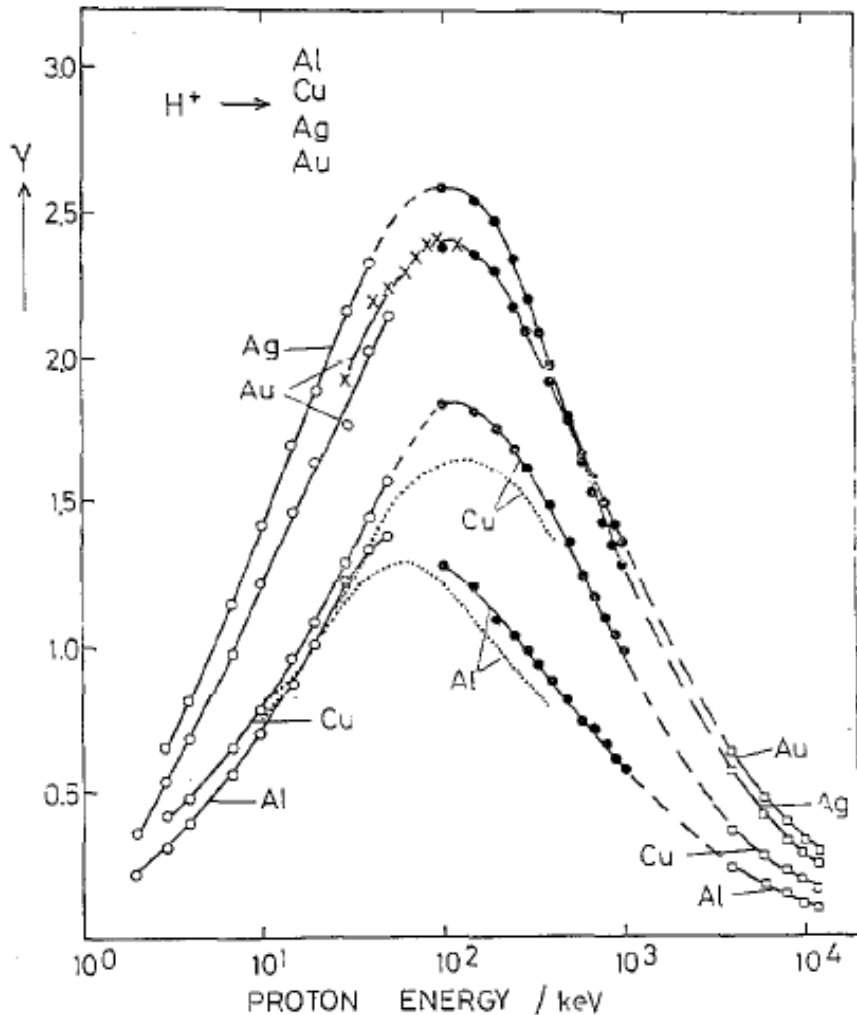
推測1 : 500keVまで比例関係が変わらないとすると、

→ 500keV時のESD yieldは数100程度。(Doseが小さい場合)

推測2 : ESDで発生した分子のうち、約1%程度がイオンとして放出。

Theodore E. Madey and John T. Yates Jr., JVST 8 (1971) 525

## 文献値からの推測(2)



### 【2次電子放出】

2次電子放出の効率(効率はイオンのエネルギーと打ち込まれる側の原子で異なる。

チタンへのイオン衝撃による2次電子放出効率(B)は、500keV protonで約1.2程度と推測。

### 【その他の影響】

光刺激脱離(PSD)はESDより2~3桁低い  
ため、放電現象の主要要素となりにくいと  
推測。(A\*Bのみを考える)

以上から、

ESD yieldが85と仮定した場合、  
イオンの発生効率(A)はおよそ0.85程度。  
 $A*B > 1$ となり、放電条件が成立する。

R. A. Baragiola, "Principles and mechanisms of ion induced electron emission", NIM B78 (1993) 223.

# 放電時の発生イオン量の見積

(α) 放電時の電荷量から発生イオン数を見積もる。

電子銃の浮遊容量およびHV電源の容量の合計:  $\sim 0.9$  nF

放電による電圧降下が43kVの時、電荷量は $39\mu\text{Coulomb}$

さらに2次電子放出係数が1.2と仮定した場合、放電電荷の内訳は、

電子:  $1.3 \times 10^{14}$  個      イオン:  $1.1 \times 10^{14}$  個

(β) 放電時のガス放出量から発生イオン数を見積もる。

放電発生時のガス放出成分は水素と仮定。

放電による電圧降下が43kVの時のガス放出量(水素換算)は、

$$3.0 \times 10^{-6} \text{ Pa m}^3 = 7.4 \times 10^{14} \text{ H}_2$$

このうち1%がイオンとして放出。

$$\alpha \sim 15 \times \beta$$

このミスマッチについては？



# ミスマッチの原因の推測

## 1. ESDによるイオン発生効率

文献から推測した1%の値は、低電界条件下のデータ。  
高電界ではイオンとして脱離する確率が高くなると推測。

## 2. ESDによって発生するガス種

今回の見積りでは発生ガスを水素のみと仮定。  
ESDでは水素の他にCOも主成分の一つ。  
重イオンの衝撃によって2次電子放出係数が高くなると推測。

## 3. 排気系および真空計の配置関係

今回の見積りは、TMP引き口の圧力変化からガス放出量を評価。  
ポンプの配置やコンダクタンス、実効排気速度の評価が必要。  
数10程度のESD yieldがあればもっとガス放出量が多いはず。

### 今後の方向性

1に関するESDが関与する不確定なイオン発生効率を調査する計画  
科研費基盤C:「超高電圧デバイス実現のための超高真空ギャップ絶縁の基礎研究」

# まとめ

- 放電が連続的に上昇する(放電電圧の記憶効果)は、ESDによって発生するイオンが放電と関わることで自然に説明ができる。
- 放電停止電圧が存在し、そして放電停止電圧以下の電圧では長期的に放電が発生しないことを実験で明らかにした。

放電停止電圧は放電条件が成立する閾値存在の証拠。

- 放電電荷量とガス放出量の間には比例関係があり、放電とESDの間に明確な関係性がある。
- 放電電荷量とガス放出量から見積もられるESD起因のイオン発生量に15倍程度の相違がある。
- 高電界条件でのESD起因のイオン発生効率を今後調査する予定。

# 謝辞

cERL電子銃の立上げ(セラミック増設)、電子銃エージング運転操作で多大なご協力を頂きました。

KEK: 宮島 司 氏、内山 隆司 氏

NAT: 沼田 直人 氏、浅川智幸氏

三菱電機SS: 飯島 寛昭 氏

セラミック加速管増設全般の支援を頂きました。

QST: 羽島 良一 氏

cERL関係者の皆様には数カ月に及ぶ電子銃の改造およびエージングについてスケジュールを優先的にご配慮いただきました。モニターG、放射線科学センターのご協力により安全なエージングが実施できました。

この場をお借りして感謝申し上げます。