

超高真空における電子刺激脱離と 直流放電現象の関係

山本将博^{A)}、西森信行^{B)}

A) 高エネルギー加速器研究機構(KEK)、B) 東北大学

Outline

1. 背景

- ・ DC電子銃の真空放電現象の典型例
- ・ 定説による放電コンディショニングの解釈と疑問

2. 放電現象理解の手がかり

- ・ 電界放出暗電流と2次的荷電粒子
- ・ 電子刺激脱離 (ESD) の性質
- ・ 放電電圧の連続上昇のメカニズム

3. 実験結果

- ・ compact-ERL電子銃のコンディショニング結果

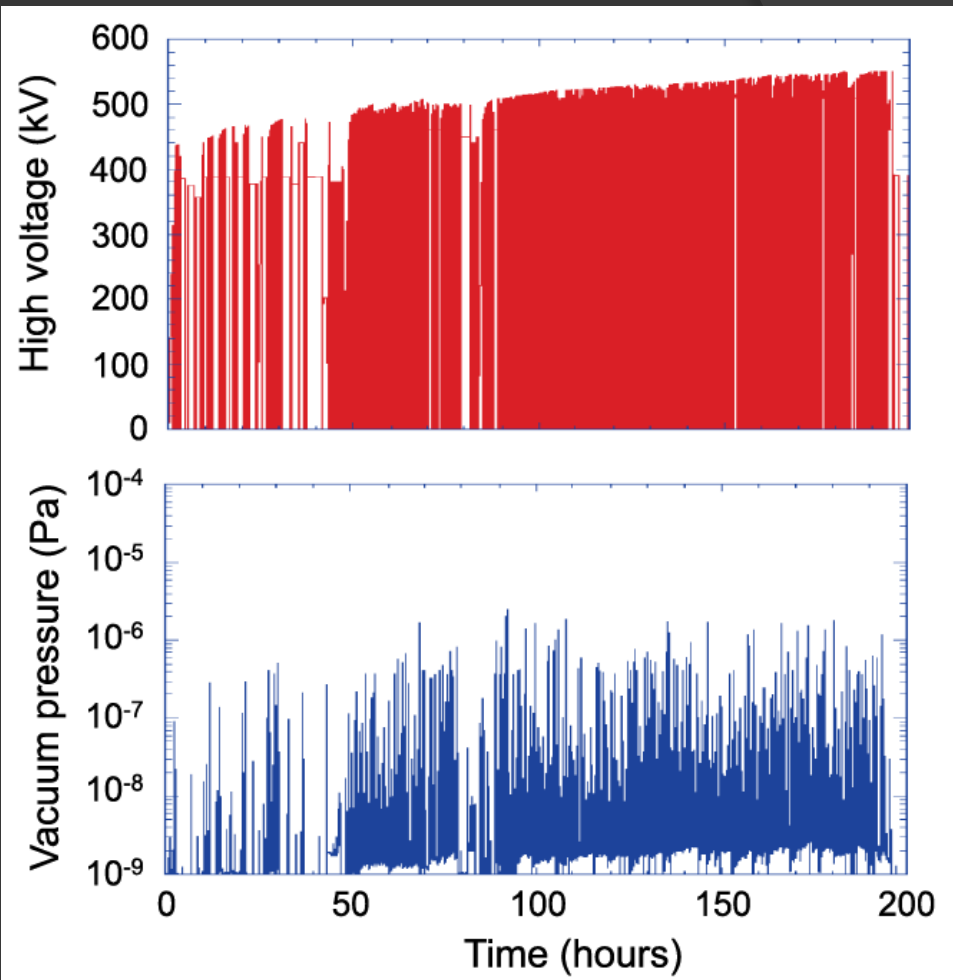
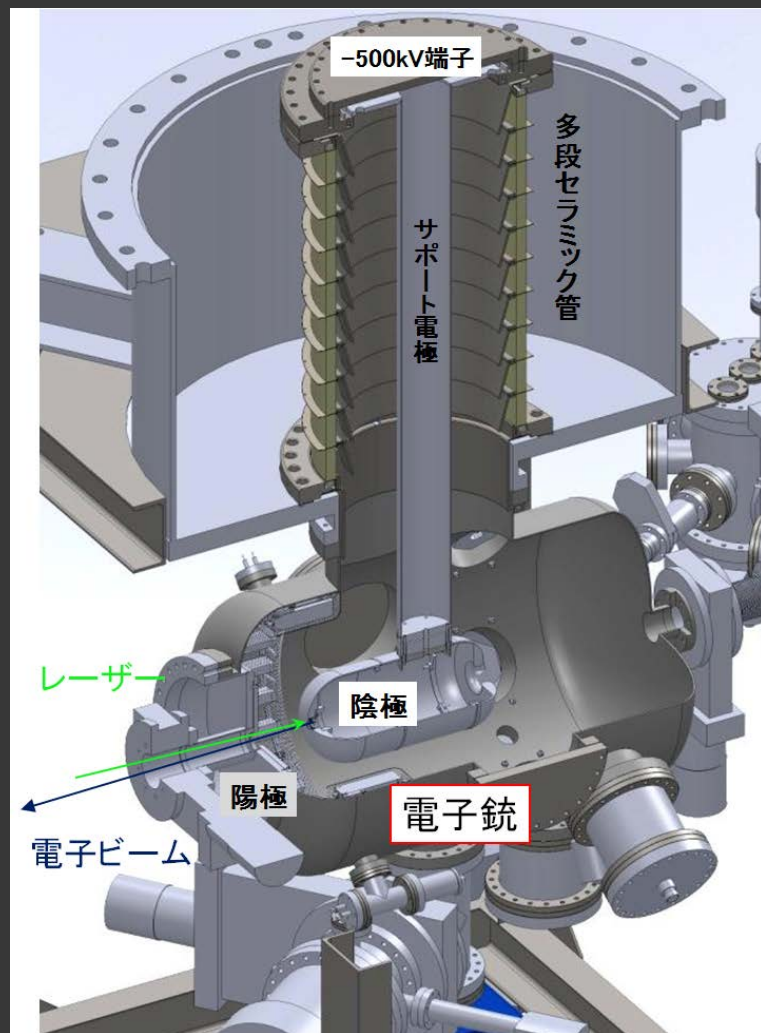
4. 考察

- ・ 文献からの推定と実験結果の比較

5. まとめ

6. 謝辞

背景：compact-ERL電子銃のconditioningの一例

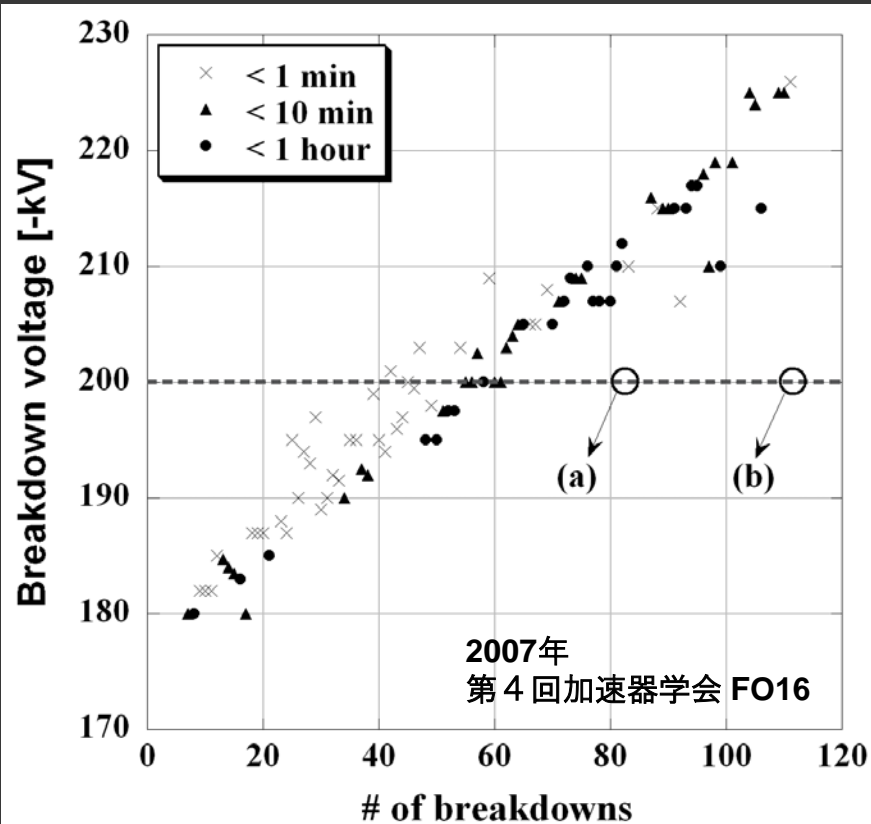


N. Nishimori et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 17 (2014) 053401.

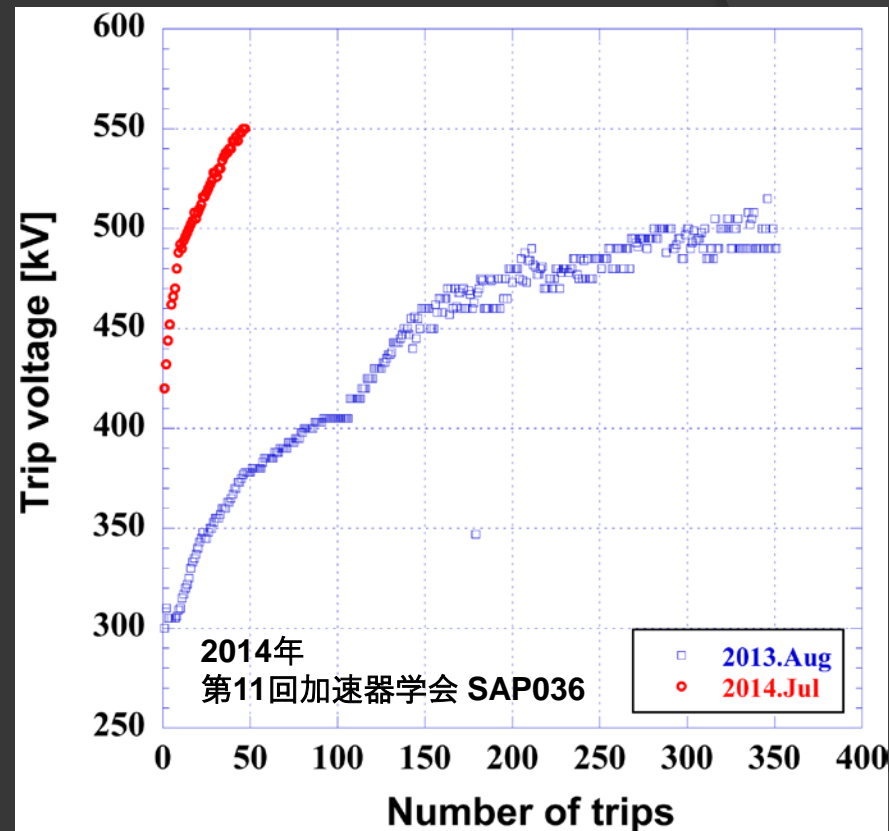
- ・ Base pressureは約 1×10^{-9} Pa。
- ・ 微小放電を多数回繰り返して保持できる電圧を徐々に上げる。

背景：その他のDC電子銃のconditioningの実例

200kV偏極電子銃



500kV第二電子銃



DC電子銃コンディショニング（3例）の特徴的な傾向

1. HV印加中、電界放出暗電流がほとんど流れない。（<10nAレベル）
2. 放電は一瞬発生して終わる。（持続放電ではない）
3. 放電電圧の上昇はほぼ連続的。（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レベルの暗電流で蒸発に至る微小突起であること。
- ・ 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。

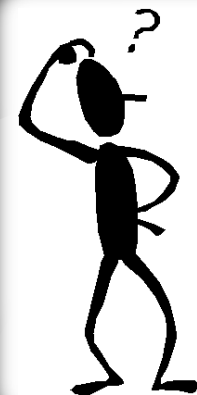
2. 電極上の微粒子の帯電&加速衝撃（クランプ説）では？

- ・ 暗電流の発生がほとんど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。**

疑問：

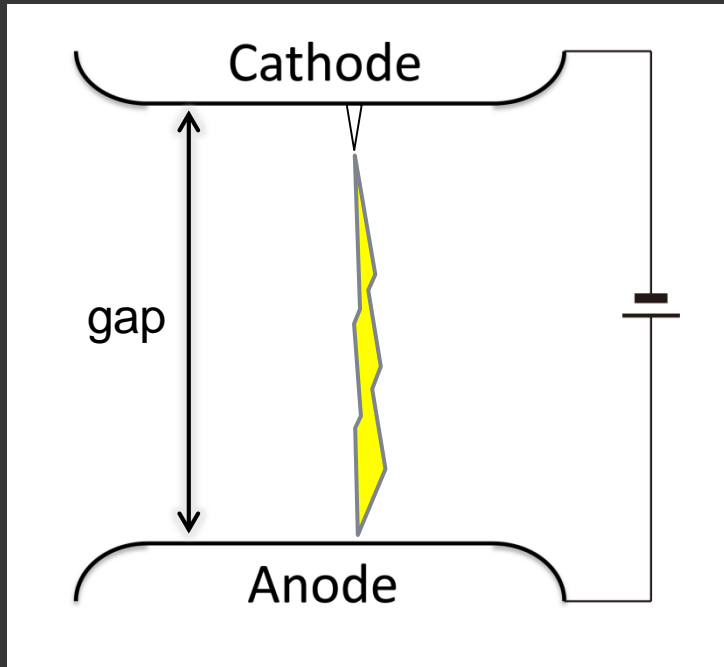
どちらの場合も不自然な条件や仮定が必要。

もっと腑に落ちる物理的な背景があるのではないだろうか...



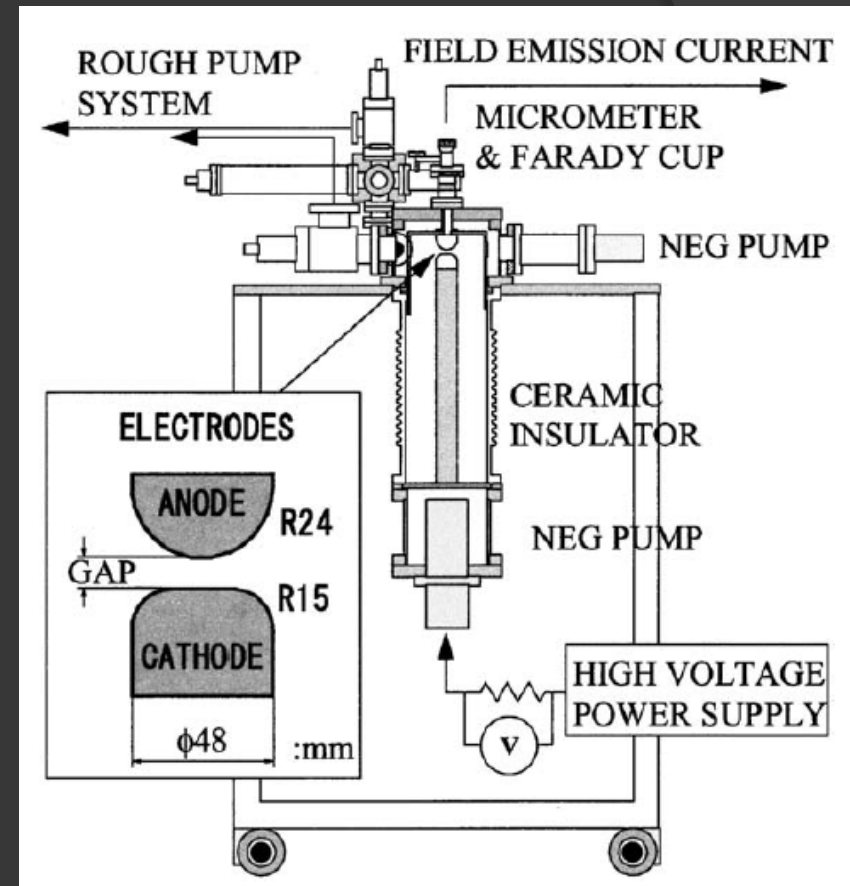
2.放電現象理解の手がかり

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



電界放出の式では暗電流は電界のみに依存

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

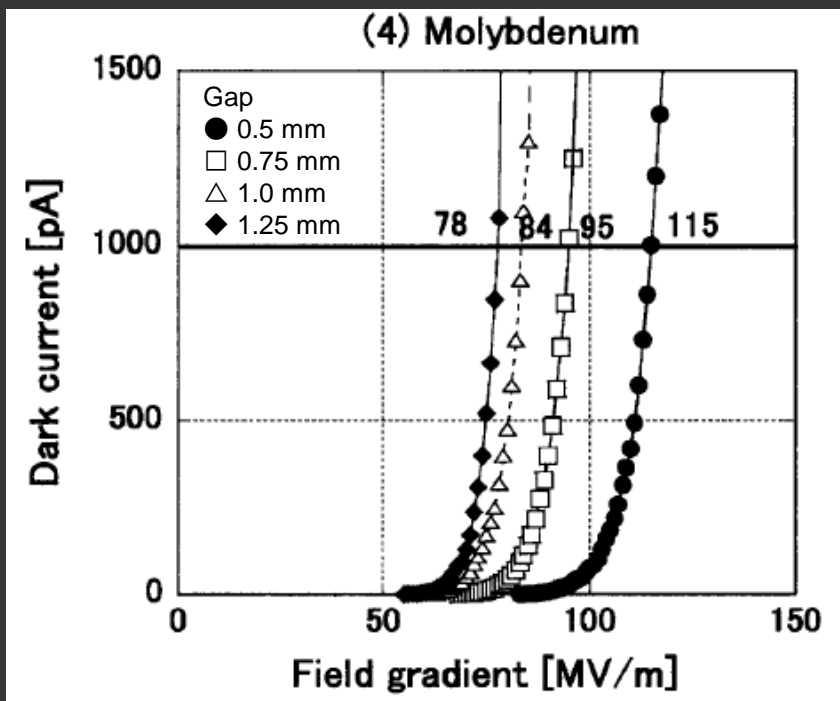


F. Furuta et al., NIM-A 538 (2005) 33.

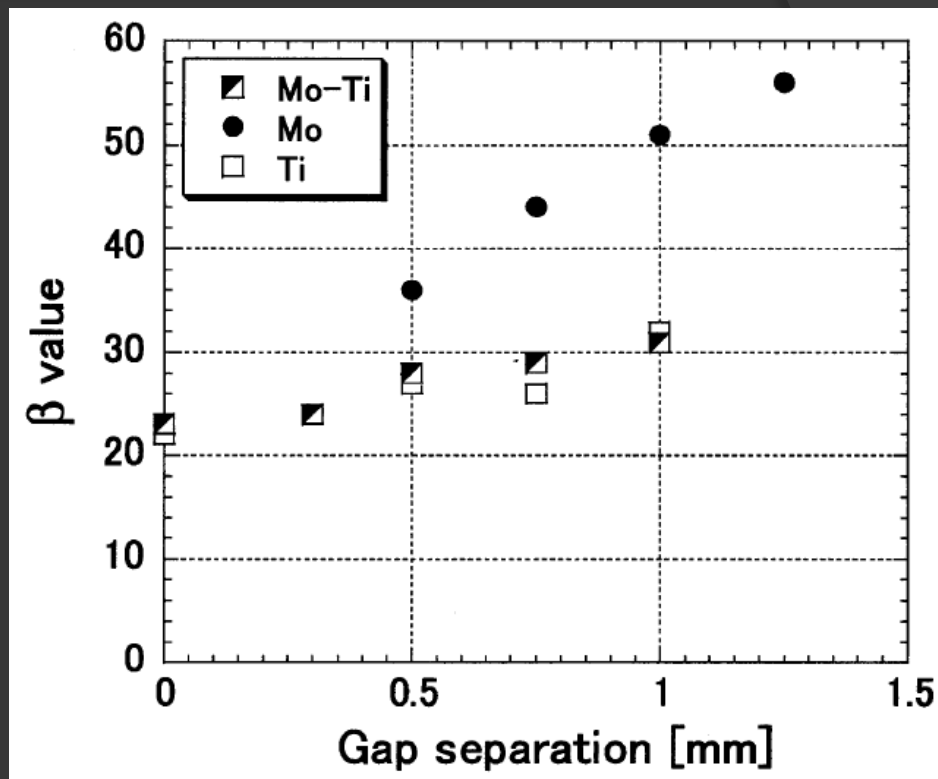
単純化、理想的に近い実験系で電界放出現象の本質的な性質を探る。
種々の金属、異なる表面処理条件に対して電界放出暗電流の測定を実施。

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

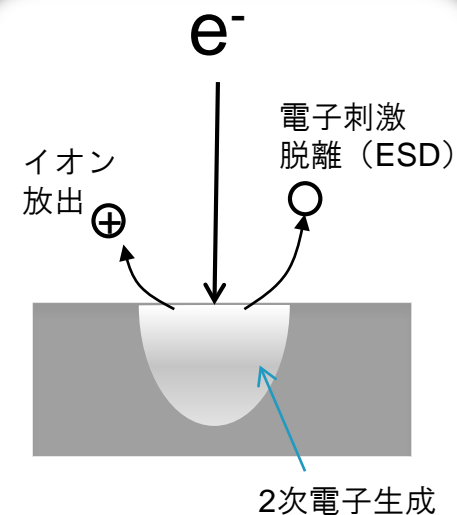
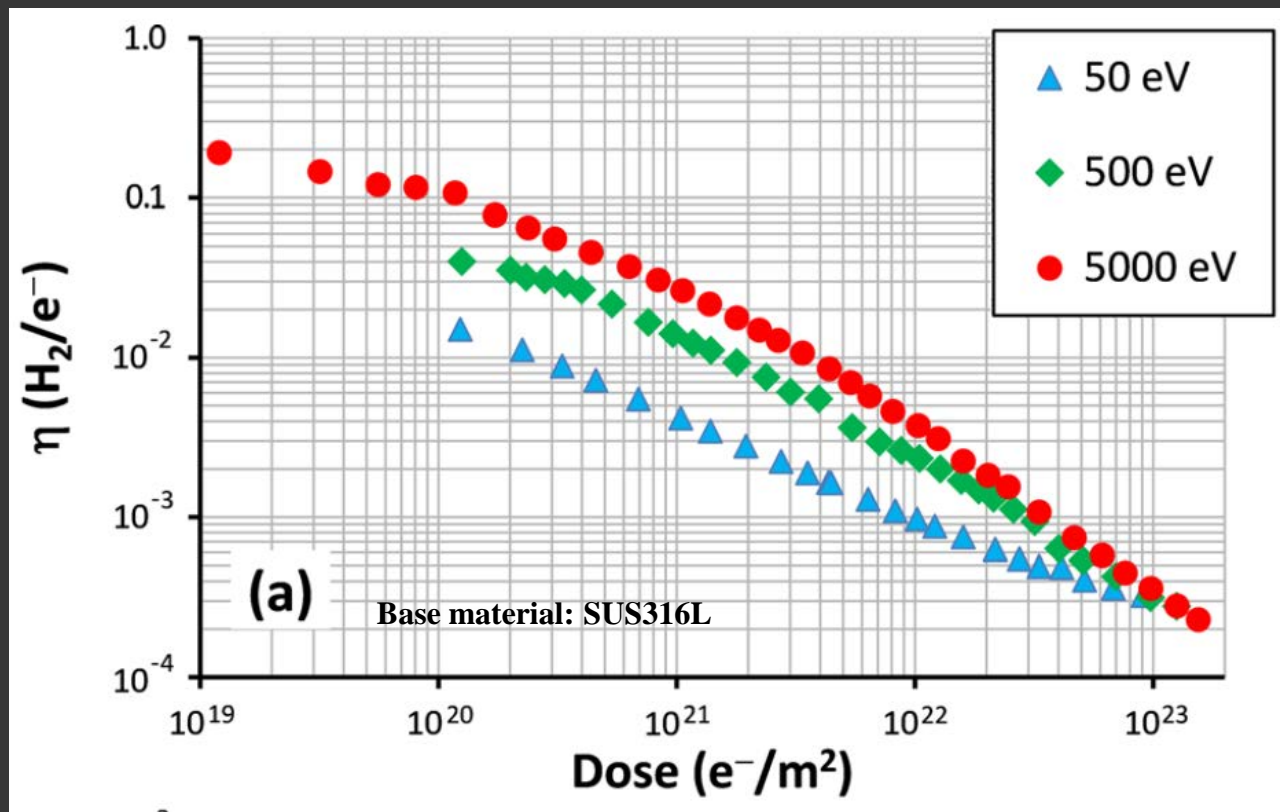


観測される暗電流 = 電界放出 + 2次荷電粒子

ギャップ大 \rightarrow 2次荷電粒子の寄与増大

- ・ DC電子銃など現実の装置ではギャップが大きい ($>10\text{mm}$)。
- ・ 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

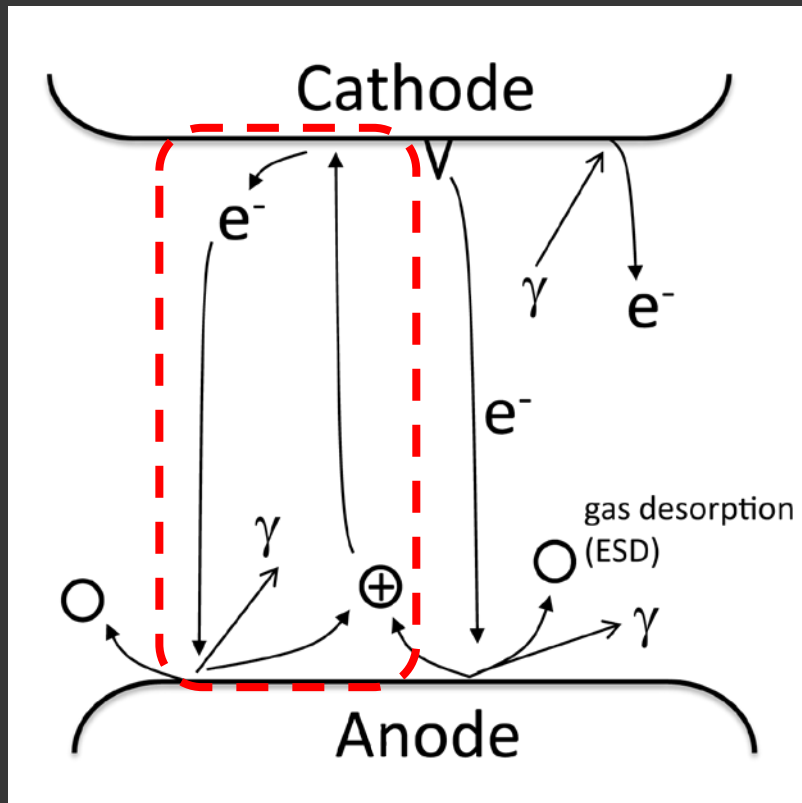


Oleg B. Malyshev et al., J. Vac. Sci. Technol. A 31 (2013) 031601

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) に伴って放電条件が成立する電圧が徐々に変化するはず。**



超高真空下の直流放電回路

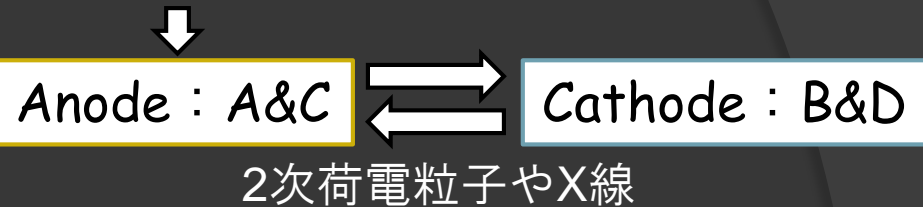


超高真空下の放電回路の4要素

- 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: 電子衝撃による制動・特性X線放出
- D: X線刺激による2次電子放出

J.G.Trump & R.J. van de Graaff, J. Appl. Phys.
18, (1947) 327

種：電界放出等による微量な電子放出等



$(A \times B + C \times D) > 1$: 放電発生

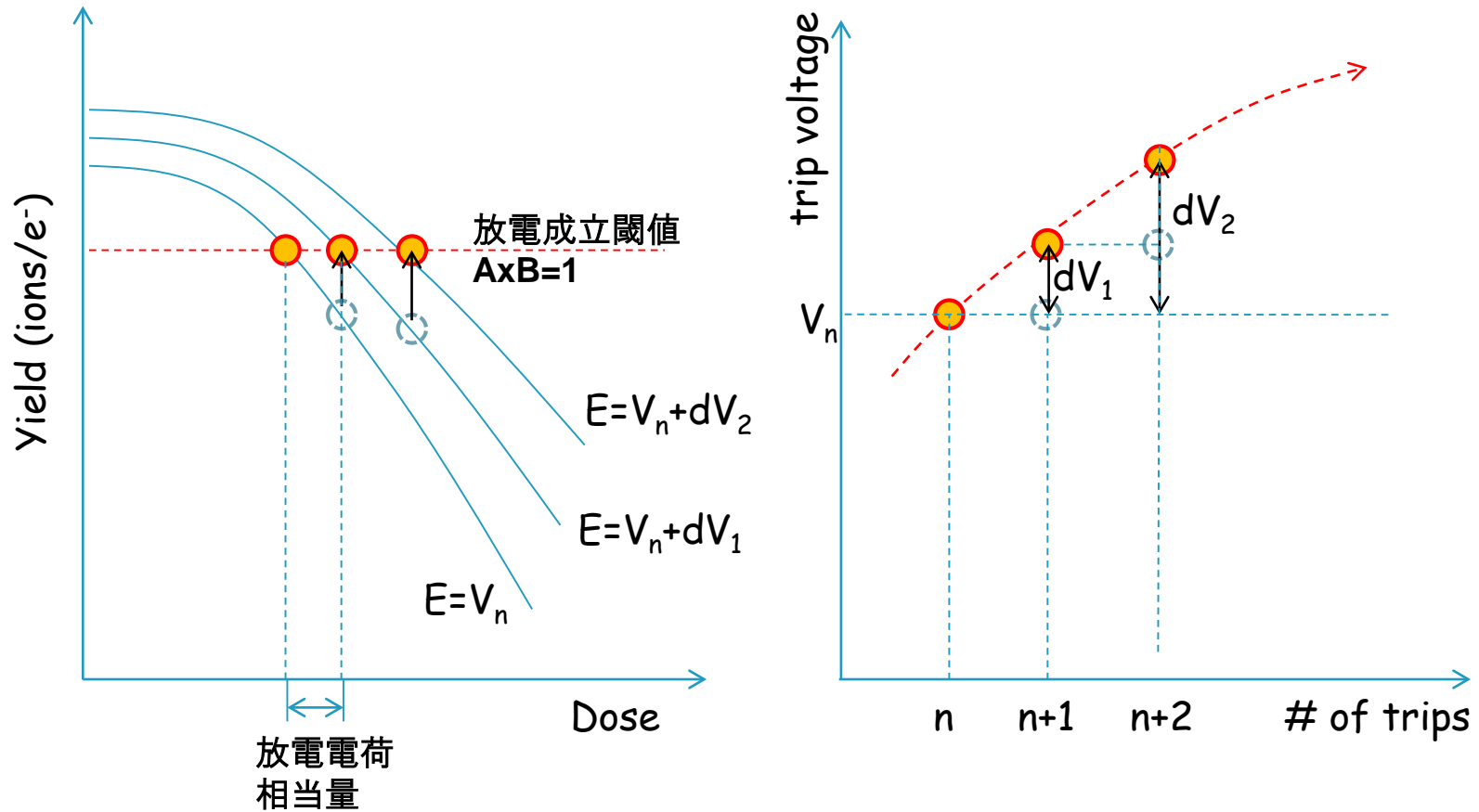
放電による電圧降下

$(A \times B + C \times D) < 1$: 放電終息

ESDの履歴が放電電圧の連続的な上昇の根源と推測。

「AxB」の回路に注目し、放電電圧の記憶現象を自然に説明するメカニズムを提案する。

放電電圧の記憶のメカニズム



放電毎に放電電圧が徐々に上昇する（放電電圧の記憶）現象を無理なく理解できるモデル。

3.実験結果

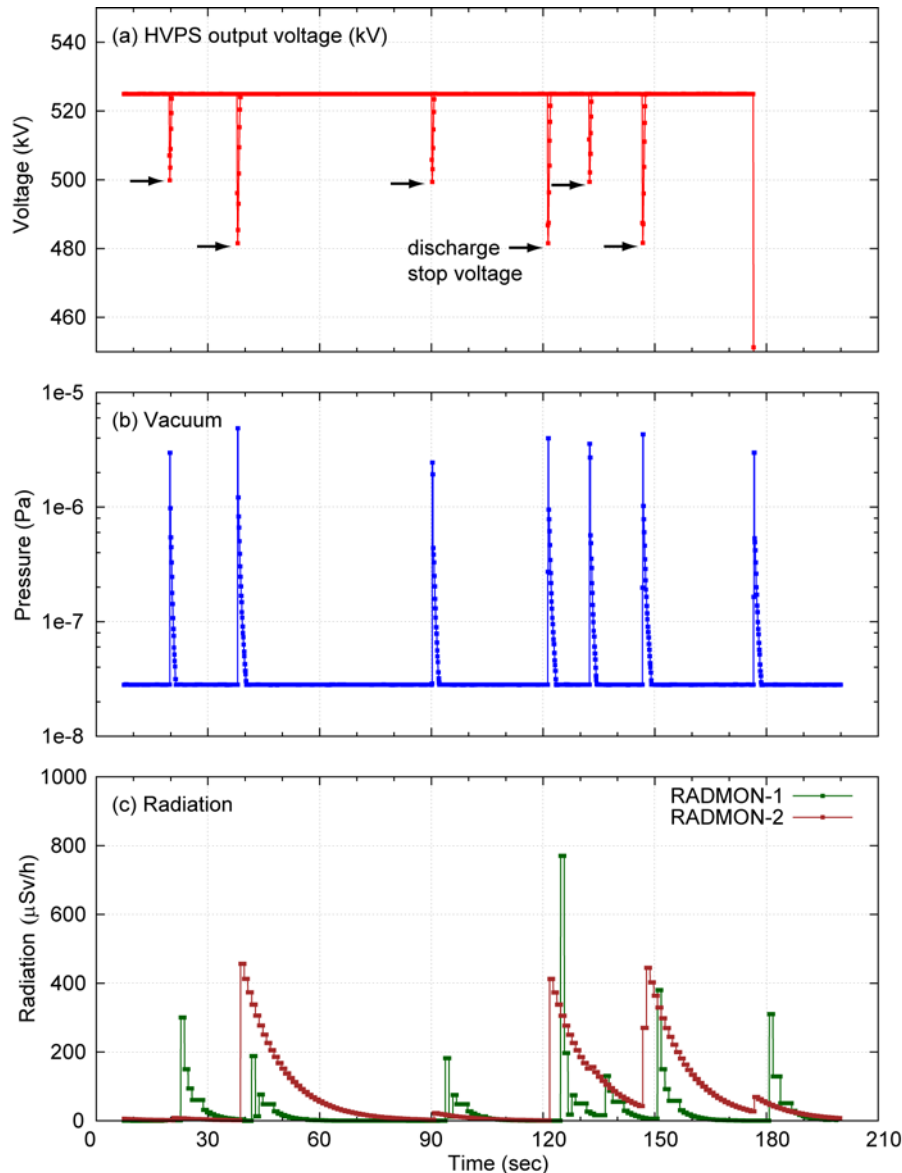
compact-ERL電子銃 conditioningの結果

実験結果に関する詳細は下記の論文に掲載

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

関連発表 (MOP048) : 西森信行 他、「電子銃の改造による500kV達成」

Conditioning中の電圧・真空・放射線の変化



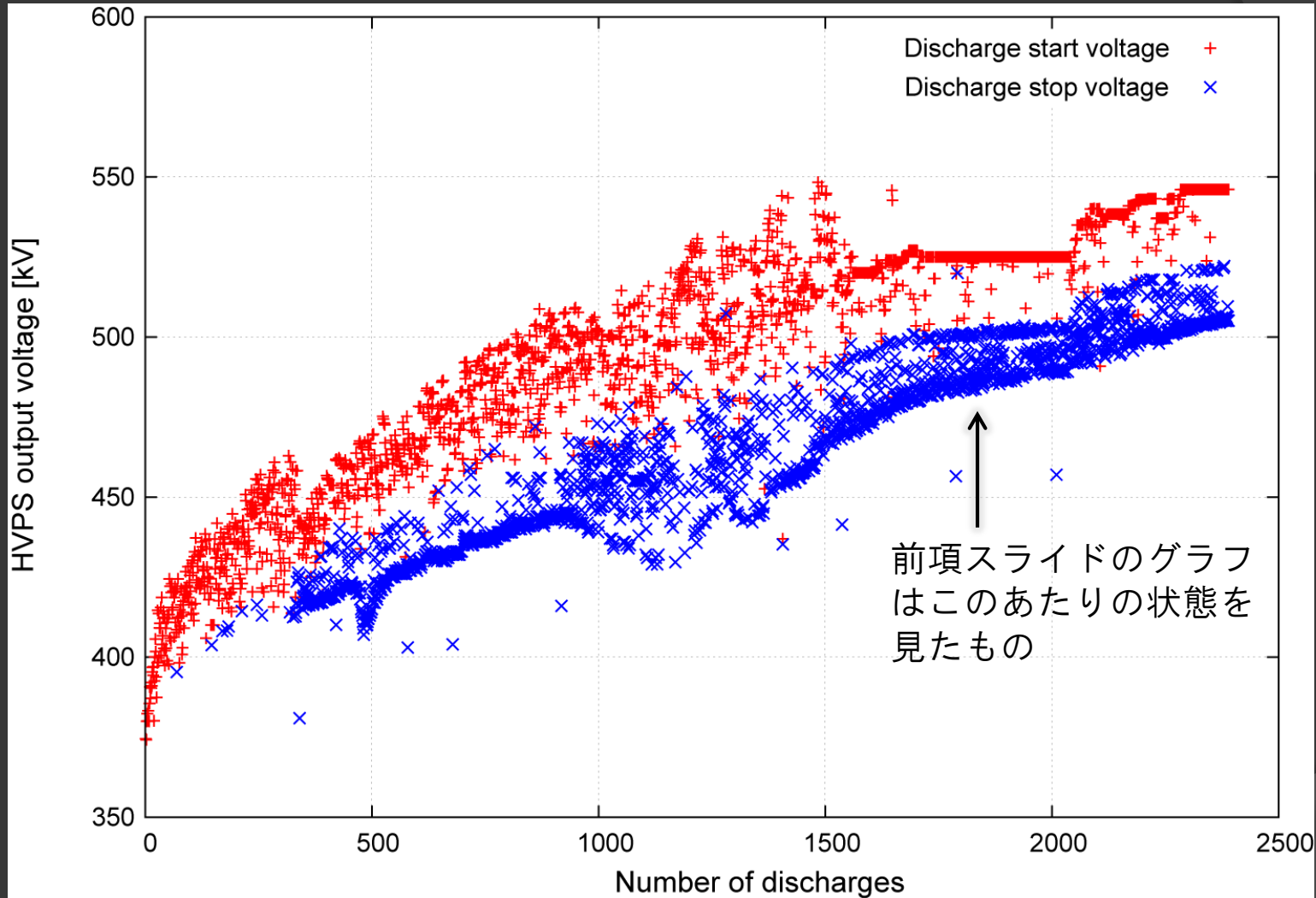
- ・ 出力電圧 (赤)
C-W電源内の抵抗を流れる電流値から計測。
- ・ 真空 (青)
TMP排気口に設置された応答性の早い電離真空計(Piffer PBR260)を利用。
- ・ 放射線
電子銃近傍の2か所で放射線を計測。
電子銃直下：電離箱 (緑)
電子銃側面：半導体検出器 (茶)

放電発生時、

- ・ 電圧降下後、インターロック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**

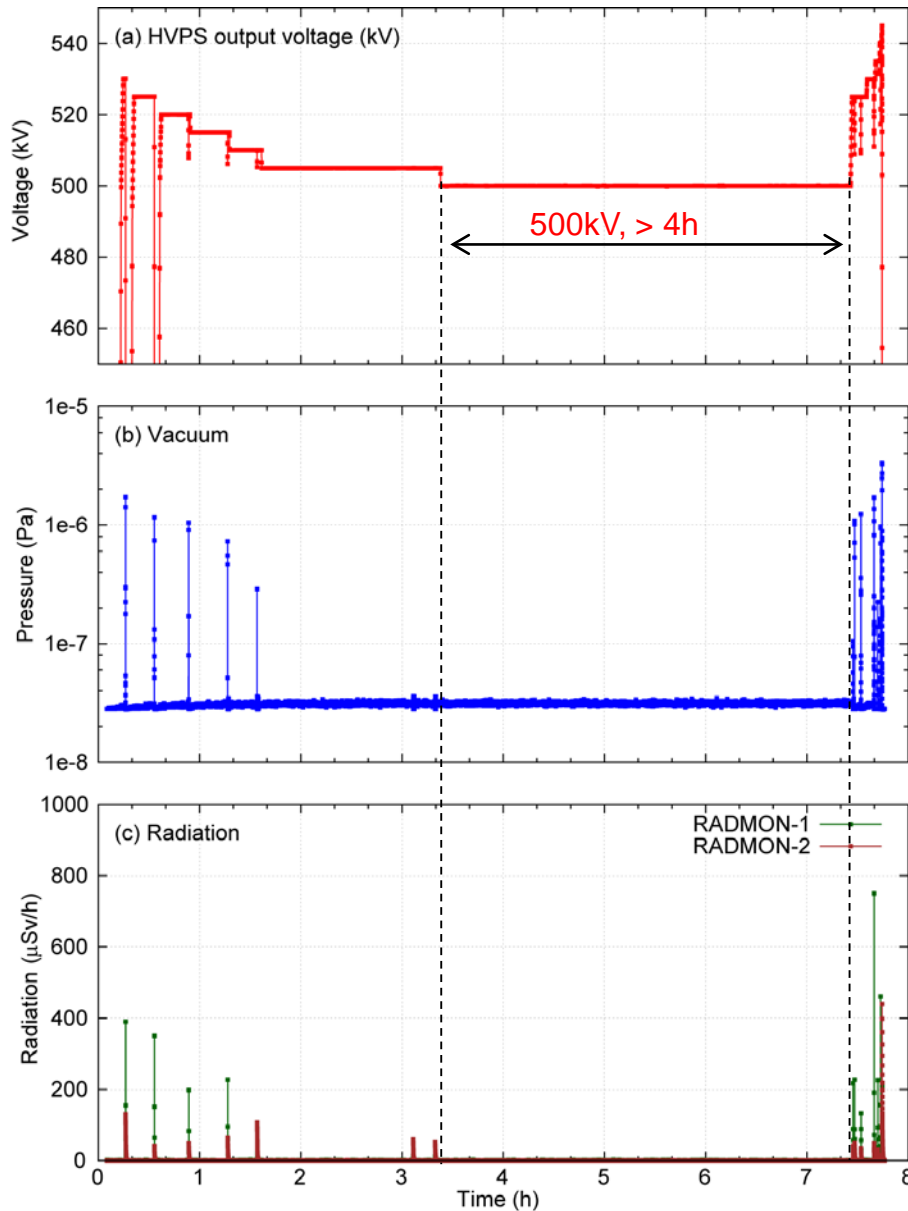
2台の放射線のモニターのデータから異なる2か所で放電が発生している可能性がある。

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。
放電停止電圧は何を意味するのか？

Conditioning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以上で放電発生を確認。
500kVでは4時間保持で放電無し。

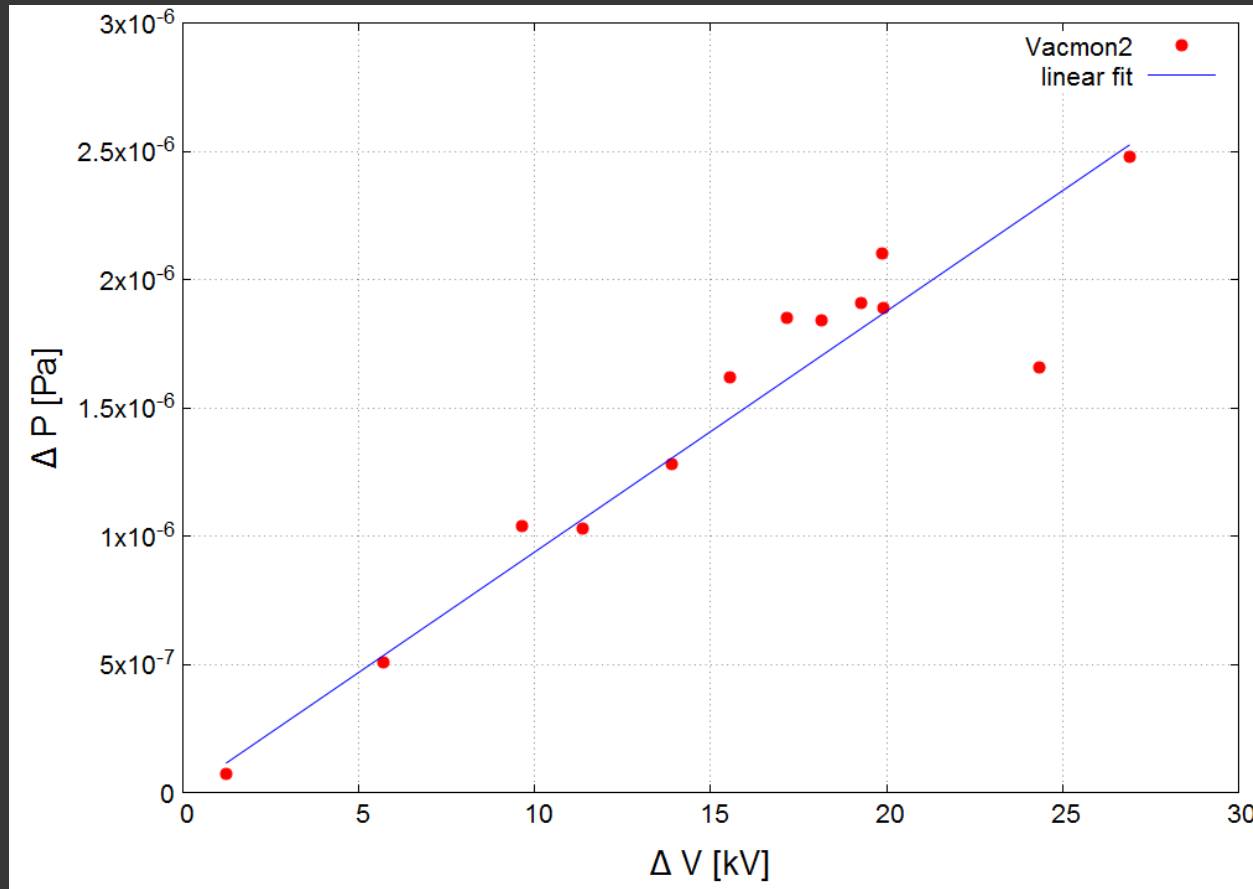
放電停止電圧は放電成立条件の閾値となる電圧を示している実験的な証拠。

電子銃の運転電圧を放電停止電圧の下限值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の間に関係性がある証拠は...？



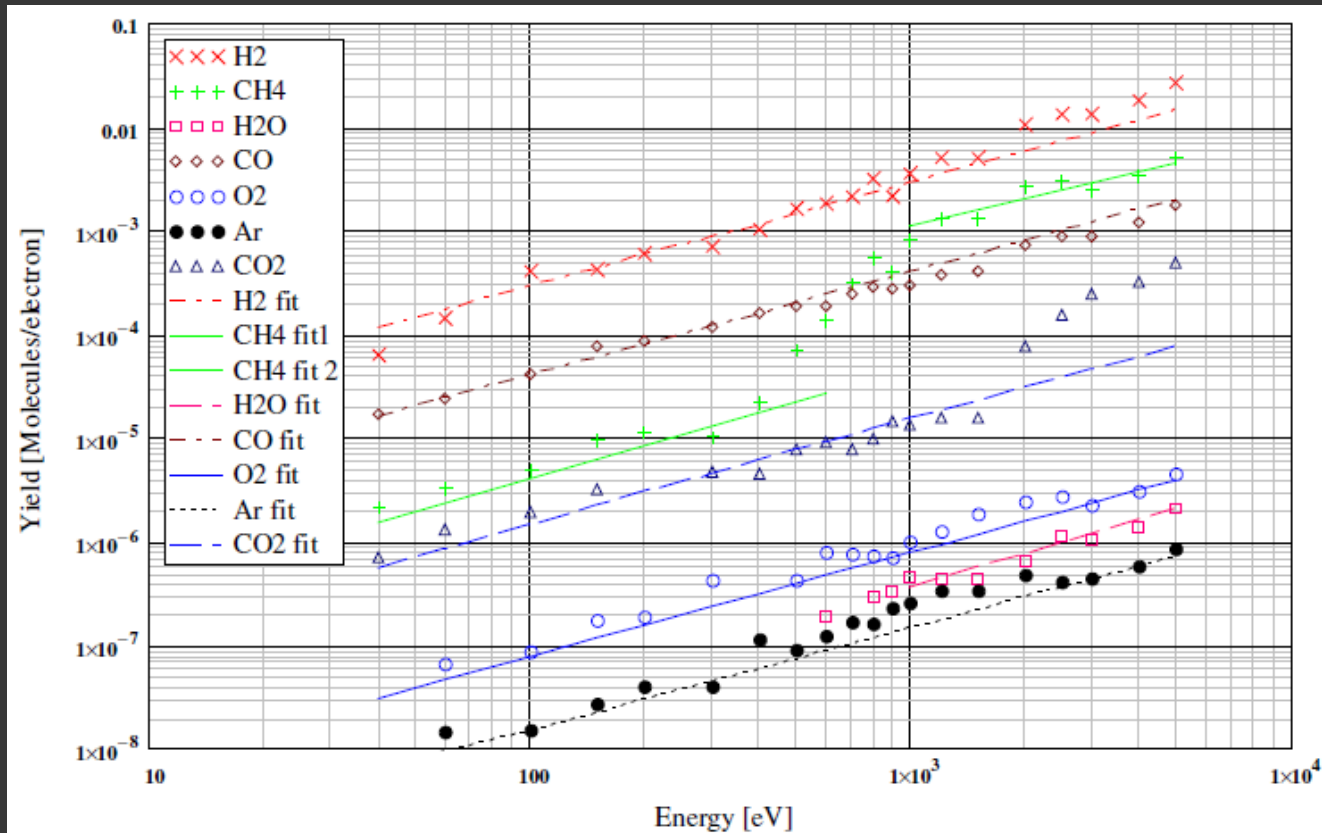
放電電荷量とESDの関係



- ・ 放電開始電圧と停止電圧の差 ΔV 、放電発生時の圧力ピーク値とBGの差 ΔP 。
- ・ **横軸は放電電荷量** (ΔV とHV電源等の静電容量の積) に対応。
- ・ **縦軸は放出ガス量** (ΔP とchamber体積の積) に対応。
- ・ 放電電荷量と放出ガス量の間**に比例関係**が成立している。
- ・ **傾きはESDの効率**に対応。

4.考察:文献値からの推定

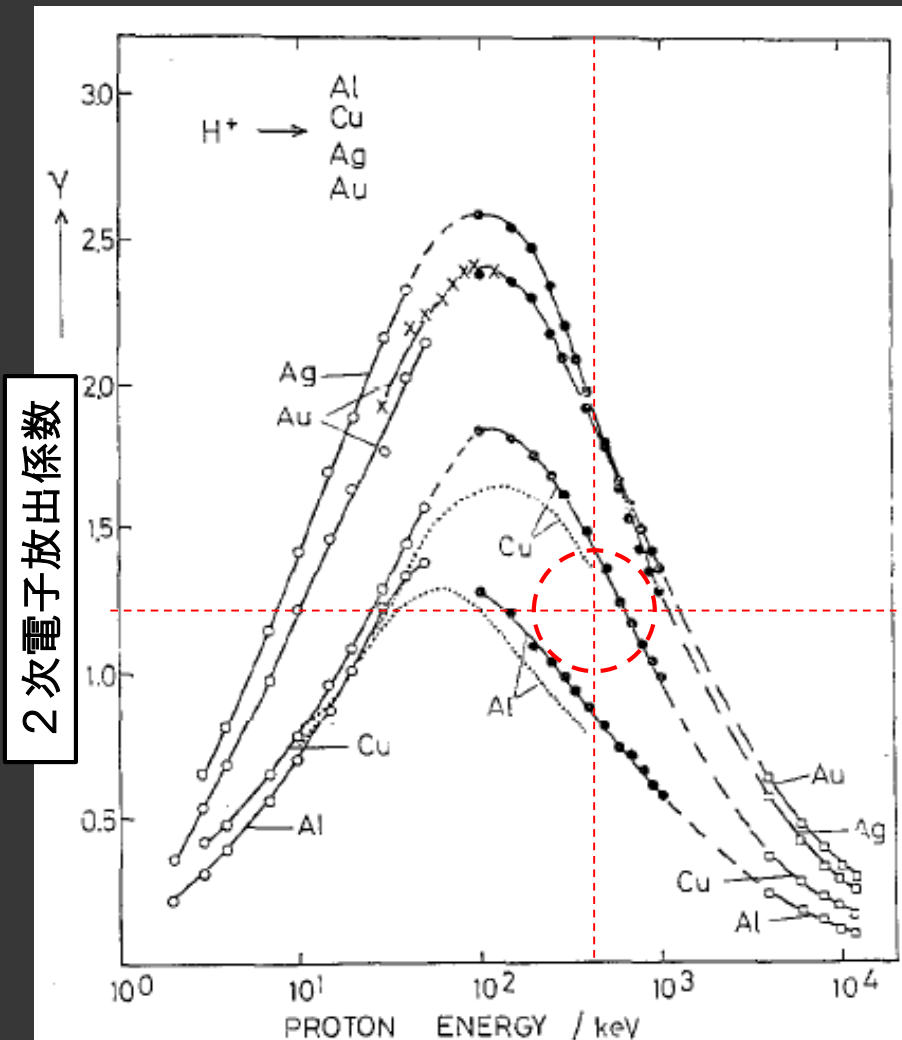
イオンの生成効率



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

- ✓ ESD効率のエネルギーに対する変化はほぼ比例の関係。
 推定 1 : 500keVまで比例関係が変わらないとすると、
 → **500keV条件のESD効率は数100程度。** (conditioning初期)
 推定 2 : ESDで発生した分子のうち、**1%程度がイオンとして放出。**
 Theodore E. Madey and John T. Yates Jr., JVST 8 (1971) 525

2次電子の生成効率



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

【proton衝撃による2次電子放出】
2次電子放出の効率はprotonのエネルギーと打ち込まれる側の核種に依存。

チタンに対する2次電子放出効率は、AlとCuの間として500keVで約1.2と推測。

Conditioningの初期状態

電圧500kVの条件下では、
イオン生成効率 (A) : 1 ~ 数 程度
2次電子生成効率 (B) : 1.2 程度

$$A \times B > 1$$

500kVより低い $A \times B = 1$ が成立する電圧から放電が始まり、放電を繰り返して500kV相当に到達する現状とESD由来のイオンが関与する放電のメカニズムは矛盾しない。

まとめ

- 放電電圧が連続的に上昇する（放電電圧の記憶）現象は、電子刺激脱離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の最小値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示した。

放電停止電圧の下限値 = 放電条件が成立する閾電圧

コンディショニング目標電圧に関する明確な指標

- 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認められた。

超高真空における直流放電はESDと深く関係し、新たに提唱したメカニズムに従って今回の放電現象が発生していると考えられる。

本発表内容の主要部分については、下記の論文に記載。

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

謝辞

cERL電子銃の立上げ（セラミック増設）、電子銃コンディショニング
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。

量研機構(QST)： 羽島良一 氏

電子銃コンディショニング運転にあたり、放射線科学センター、cERL
関係者の皆様には放射線安全、スケジュール調整ご協力頂きました。

本研究の一部は、科研費 15H03594, 16K05385 により実施されました。