

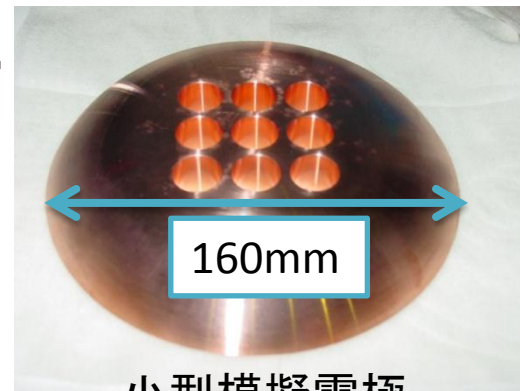
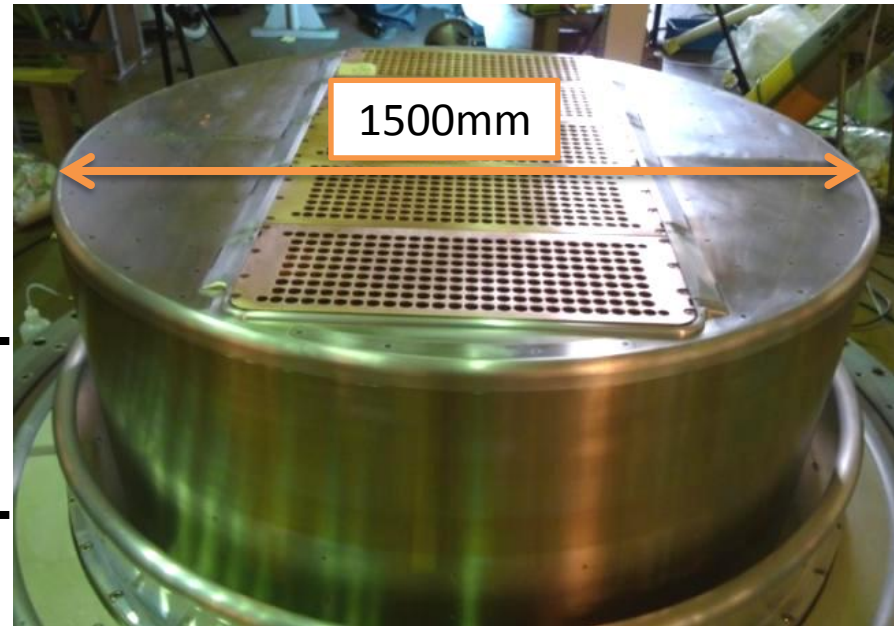
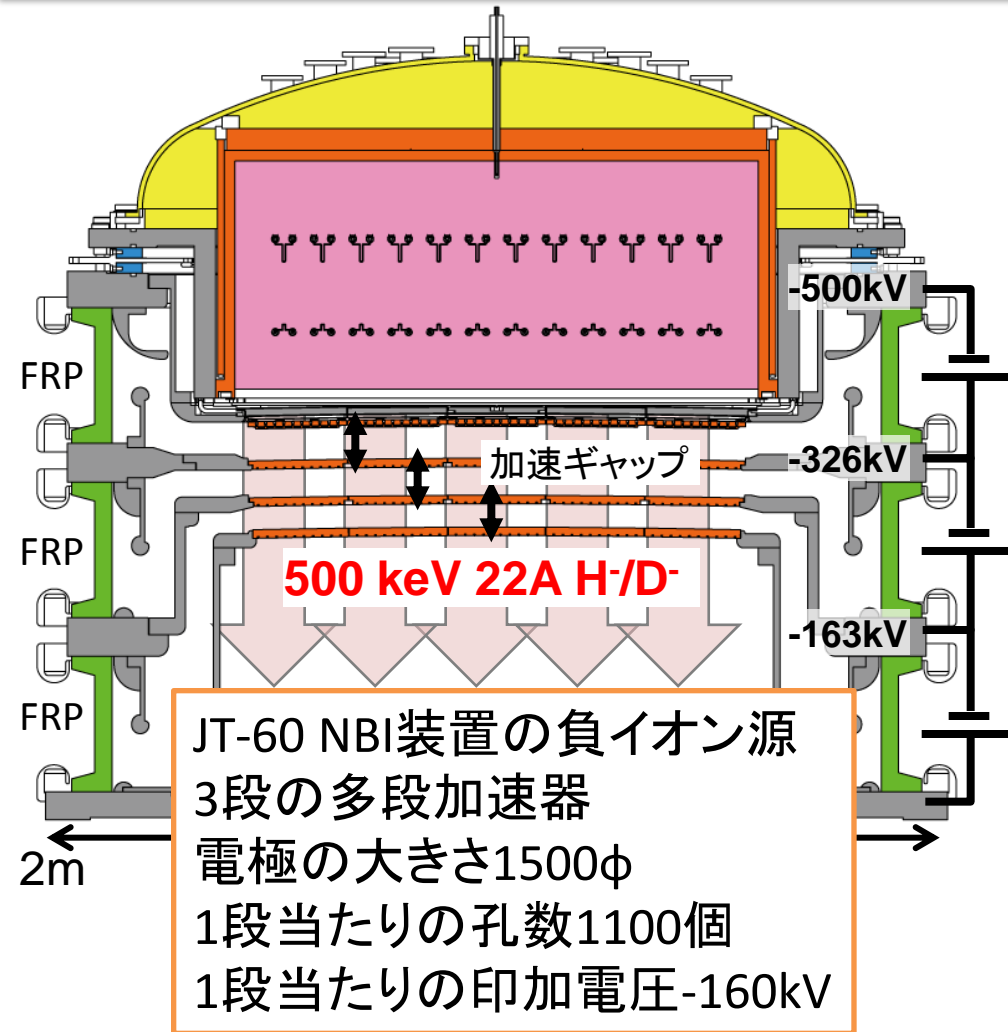
NBI用多孔電極の放電メカニズムの 解明

明石圭祐¹⁾、小島有志²⁾、吉田雅史²⁾、花田磨砂也²⁾、山納康¹⁾

1) 埼玉大学

2) 日本原子力研究開発機構 NB加熱開発グループ

背景



電極孔
16φ
CO.2

小型模擬電極

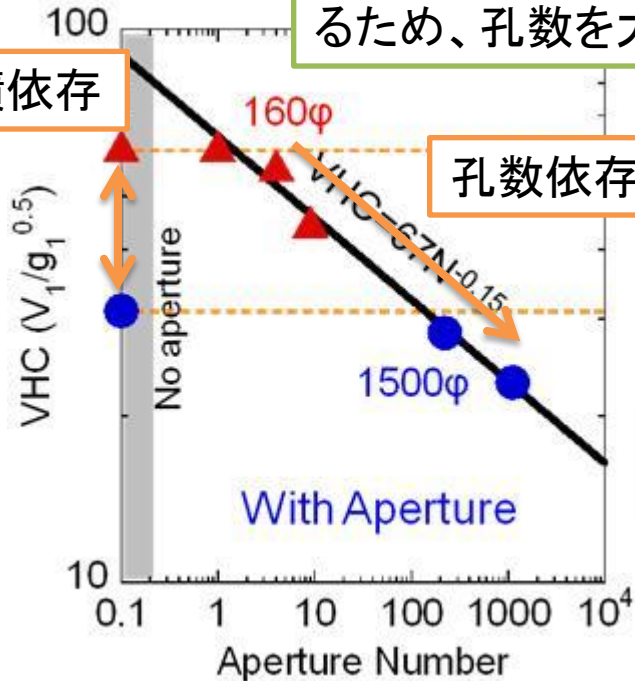
高エネルギーの中性粒子ビームを長時間安定に出力する上で、
加速ギャップ間での絶縁破壊が問題

大面積・多孔電極の絶縁破壊現象の理解

目的

大電流の負イオンビームを出力するため、孔数を大幅に減らせない

面積依存



孔数依存

電流分布

電界分布

耐電圧

孔数依存性
面積依存性

- 電極の孔数や面積が増加すると、耐電圧が低下
- 絶縁破壊は局所的な現象⇒局所的な電界分布と耐電圧の因果関係は未解明
電圧を印加した際に、暗電流が観測されている

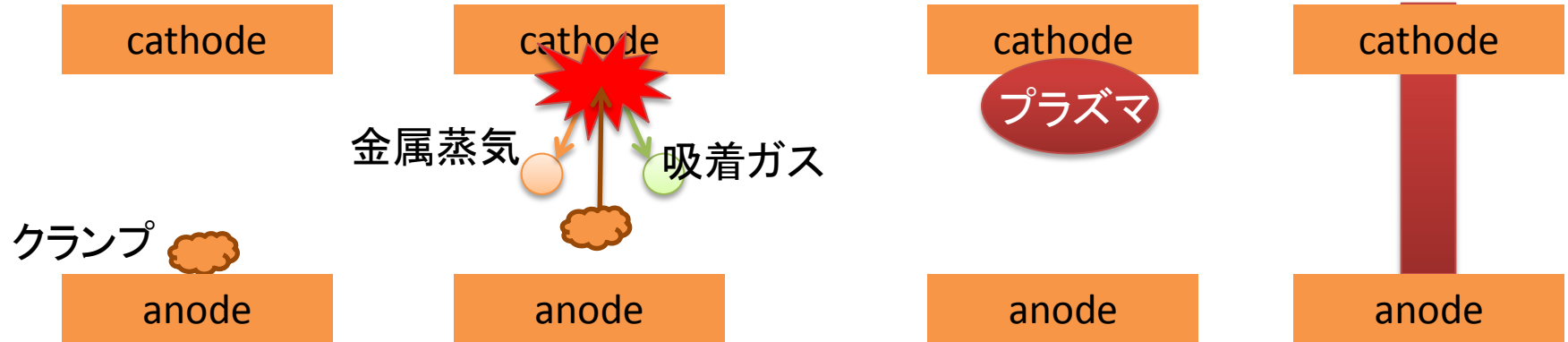
局所的な計測が必要

絶縁破壊のトリガー

局所暗電流密度と耐電圧の関係を明らかにし、
電界分布と耐電圧の因果関係を解明する

放電のモデル

クランプモデル



- ① 陽極表面上にクランプが存在
- ② 陽極から放出されたクランプが陰極に衝突し、吸着ガスや金属蒸気が放出
- ③ 放出された粒子が衝突電離を繰り返して、プラズマが成長
- ④ プラズマがある程度成長すると、BDに至る

陽極から放出されるクランプが持つエネルギー W が閾値 W_{th} を超えた時にBDが発生

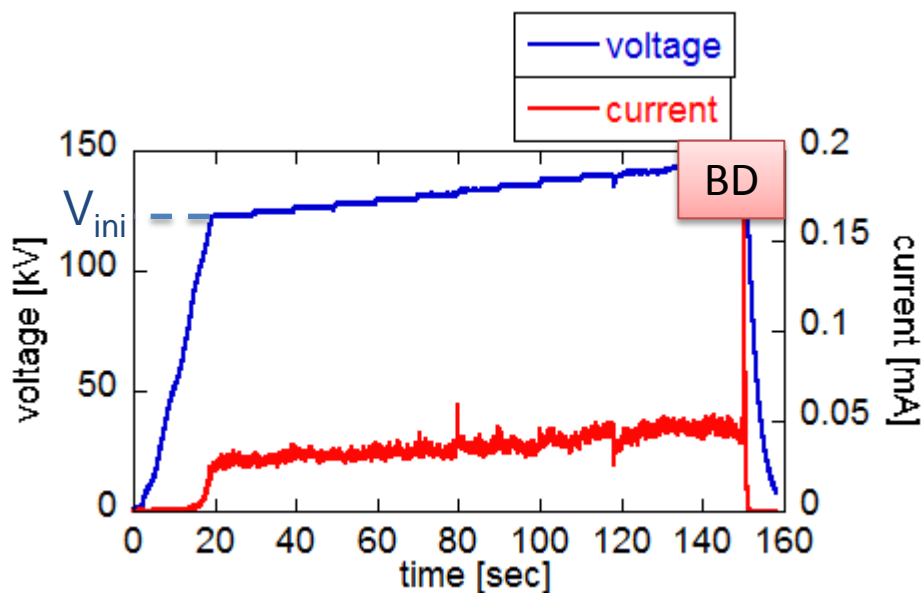
$$W = QV \geq W_{th}$$

暗電流密度分布の観測

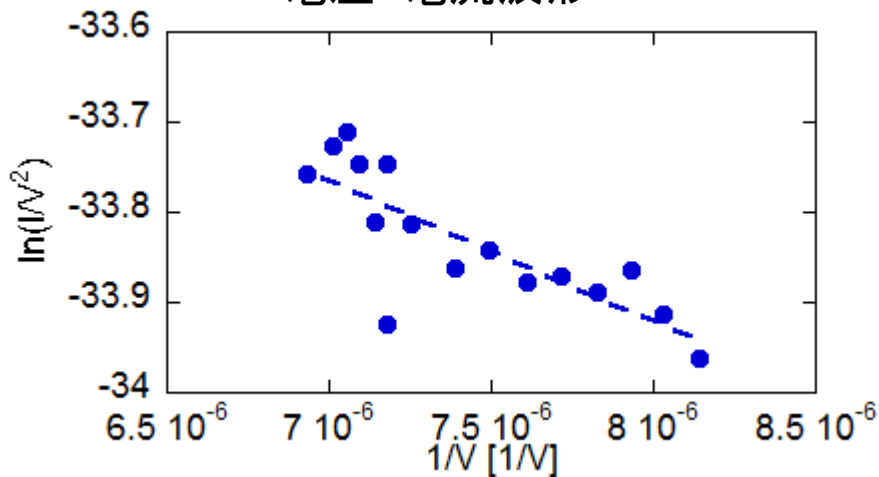
クランプの持つ電荷 Q は電極表面の電界 E と電流密度 j の関数と考えられる

$$Q = f(E, j)$$

電圧と暗電流



電圧・電流波形



F-Nプロット

左図に電圧・電流波形の一例を示す
このときの電圧と電流の関係をFowler-Nordheim式を用いて解析した

F-N式は電界放出電子電流密度 j と電界 E の関係を示す

$$j = \frac{1.54 \times 10^{-6} \times (\beta E)^2}{\phi^2(y)} \exp \left\{ -\frac{6.83 \times 10^9 \phi^{\frac{3}{2}} v(y)}{\beta E} \right\}$$

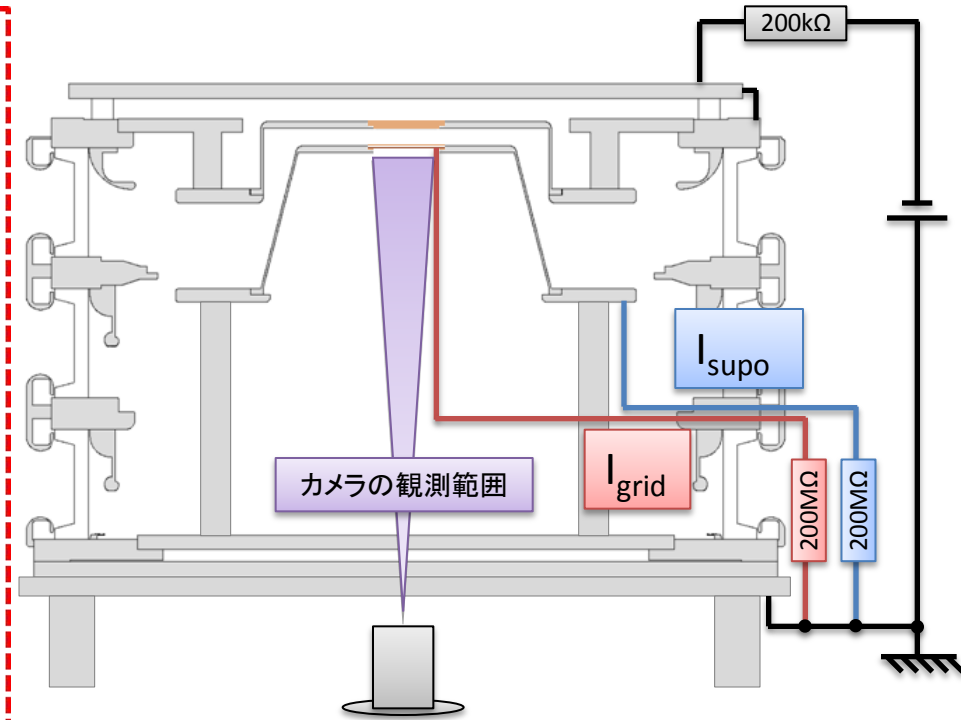
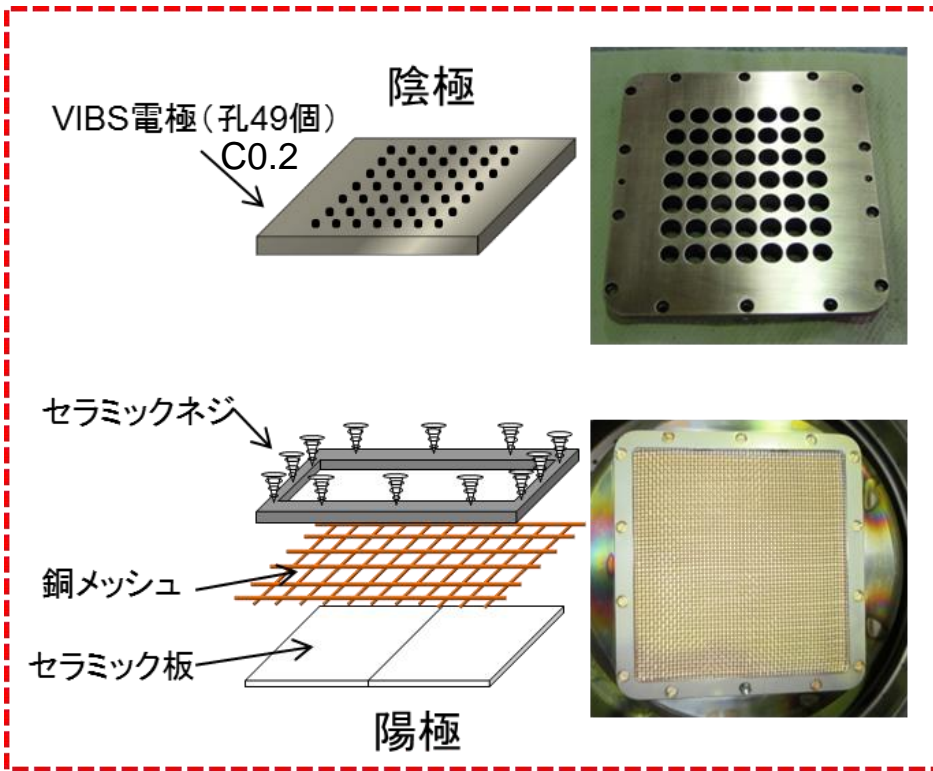
電流密度 j と電界 E を電流 I と電圧 V に置き換える

$$\ln \left[\frac{I}{V^2} \right] = - \underbrace{\frac{6.83 \times 10^9 \phi^{\frac{3}{2}} v(y) d}{\beta}}_a \frac{1}{V} + \ln \left[\frac{1.54 \times 10^{-6} \beta^2 A}{\phi^2(y) d^2} \right] \quad \underbrace{\hspace{10em}}_b$$

$$\ln \left[\frac{I}{V^2} \right] = -a \frac{1}{V} + b \quad \longrightarrow \quad \text{F-Nプロット}$$

F-Nプロットが直線に近似できたので、
暗電流の成分は電界放出電子電流

実験装置



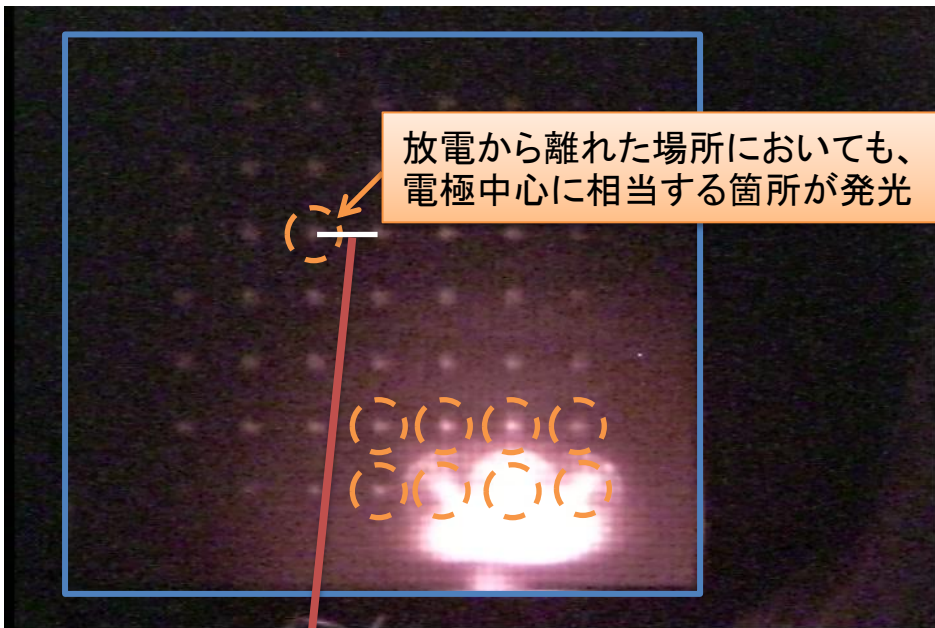
サンプリング周期 33msec

セラミックの電子衝突励起による発光分布を
観測

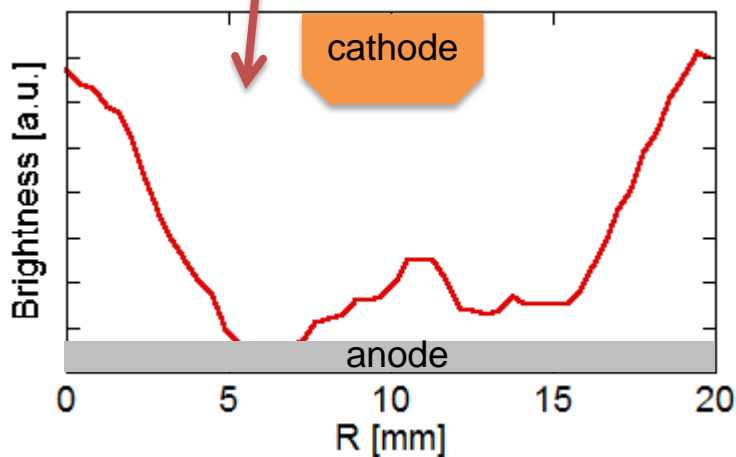
グリッドと支持枠を絶縁することにより、
発光領域のみの暗電流を測定

発光分布と定常的に流れる暗電流から暗電流分布を定量的に算出

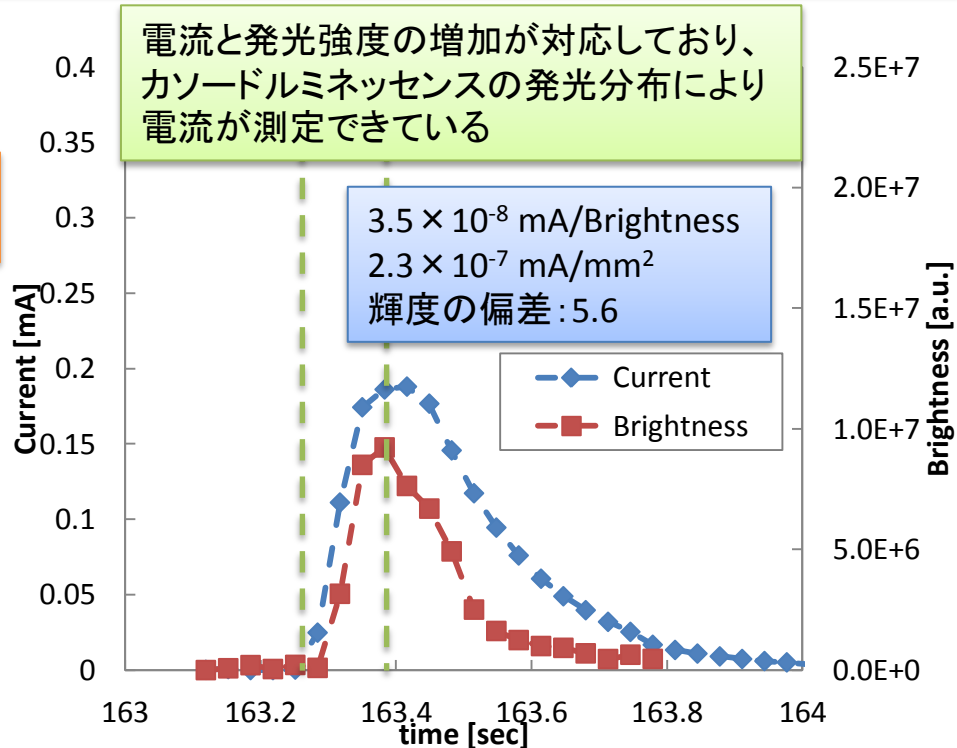
発光強度と電流値



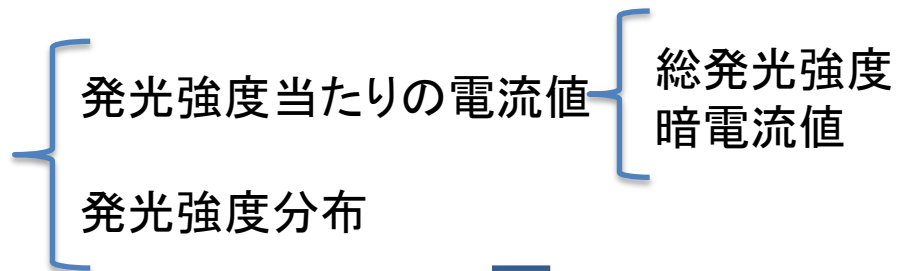
放電の発光



発光強度分布



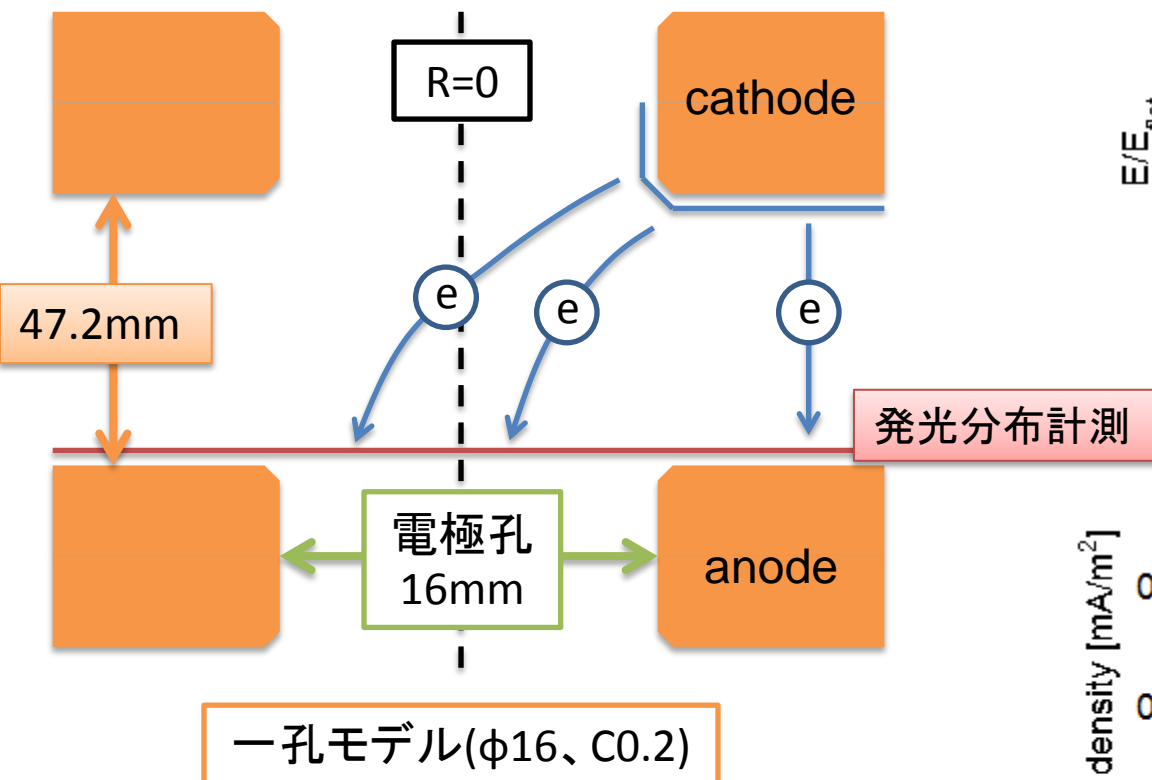
発光強度と暗電流



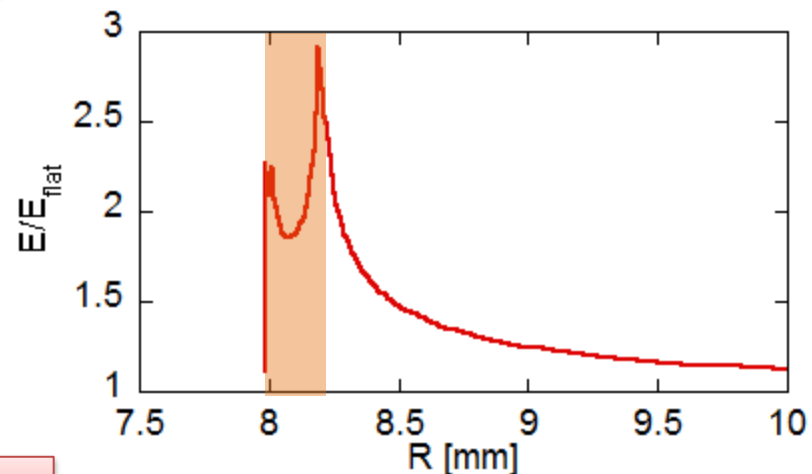
暗電流分布

電流分布

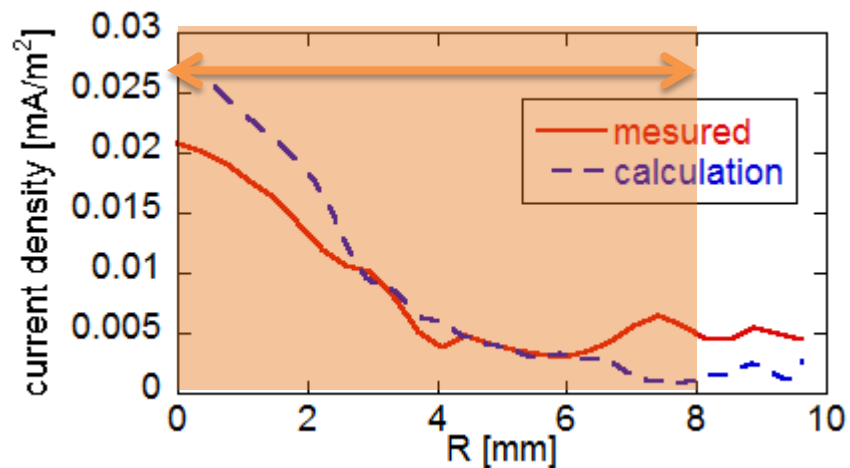
発光分布から実測した暗電流分布と電子軌道から計算した電界放出電子電流分布を比較



発光強度から求めた電流分布と電界分布から求めた電流分布がよく一致



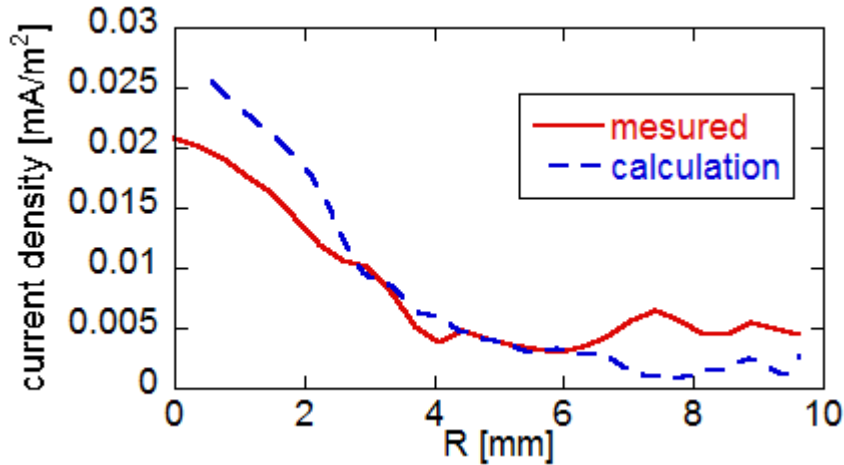
陰極の電極孔近傍の電界分布



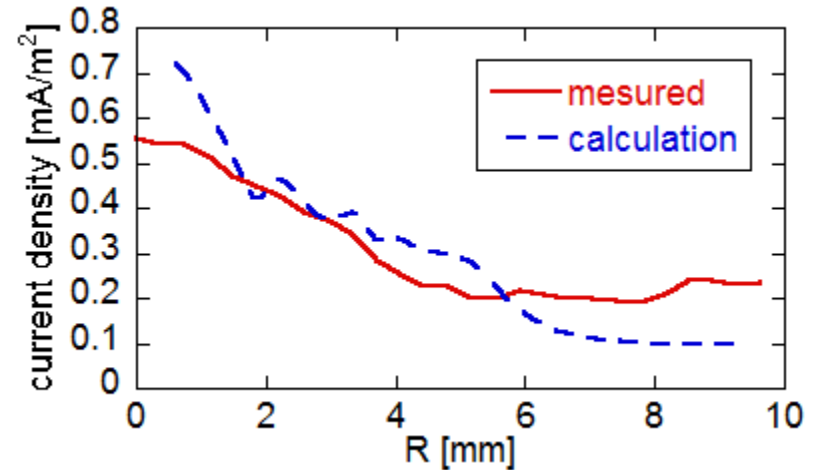
陽極表面上の暗電流分布

電圧が異なる時の暗電流分布

電圧が異なっても電流分布は一致



156.7kV



177.9kV

ギャップ長47.2mmのときの暗電流分布

陰極電界分布から暗電流分布を算出する見通しが得られた

電流分布

耐電圧と電流分布の関係を明らかにするためには、放電の発生している箇所の暗電流密度を求める必要がある

Fowler-Nordheim式

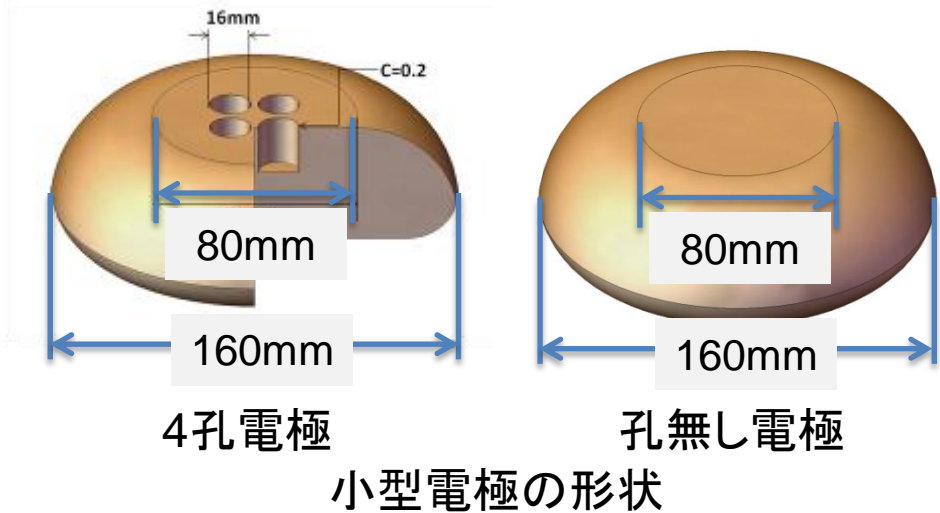
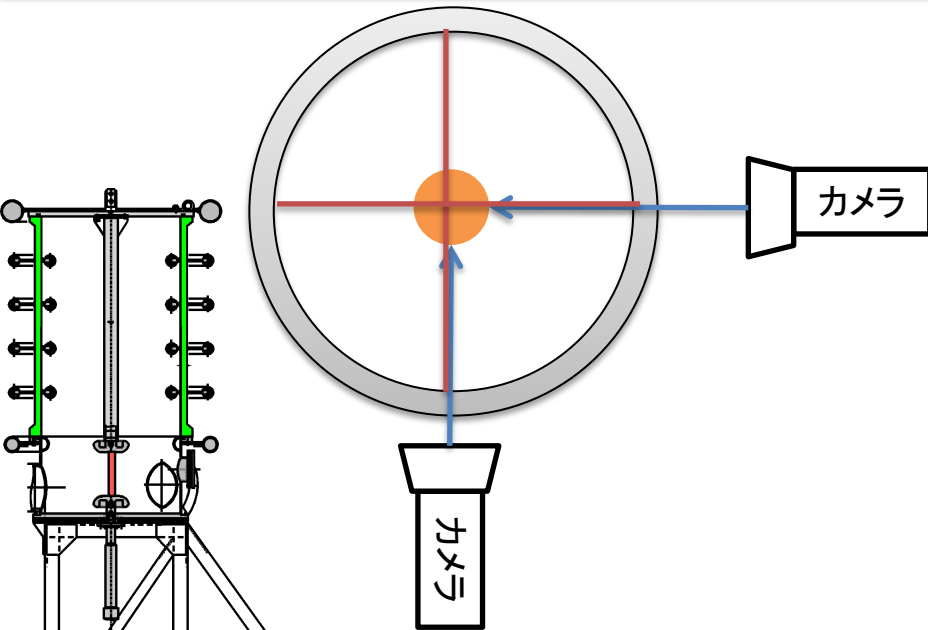
放電の発生箇所の暗電流がトリガー

電界分布

孔数依存性
面積依存性

耐電圧

放電箇所を観測



陰極側に4孔電極、陽極側に孔無し電極を設置

電極孔は $\phi 16$ 、端部は0.2mm面取り(C0.2)
ギャップ長は5~25mm

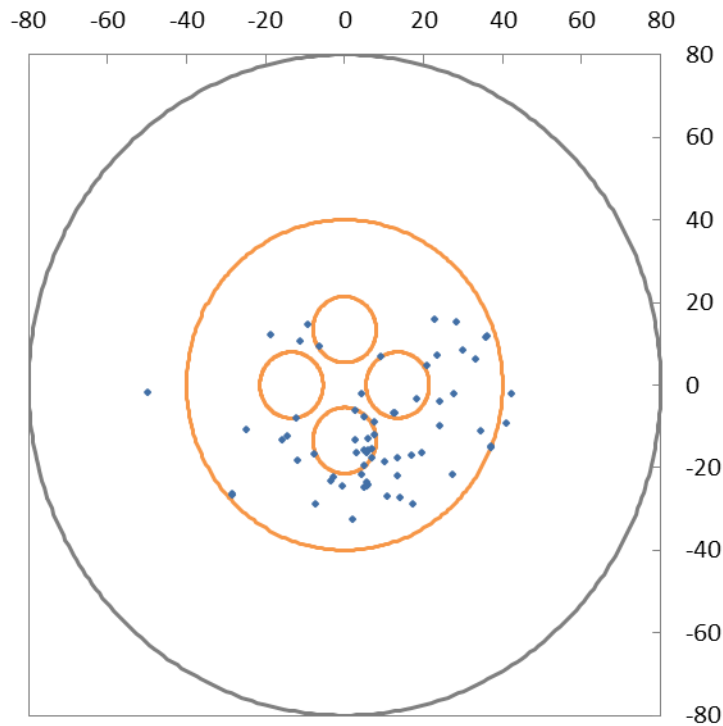
カメラを2台用いて電極ギャップ間を撮影し、放電箇所を特定

放電箇所から局所放電電界、局所放電暗電流密度を算出

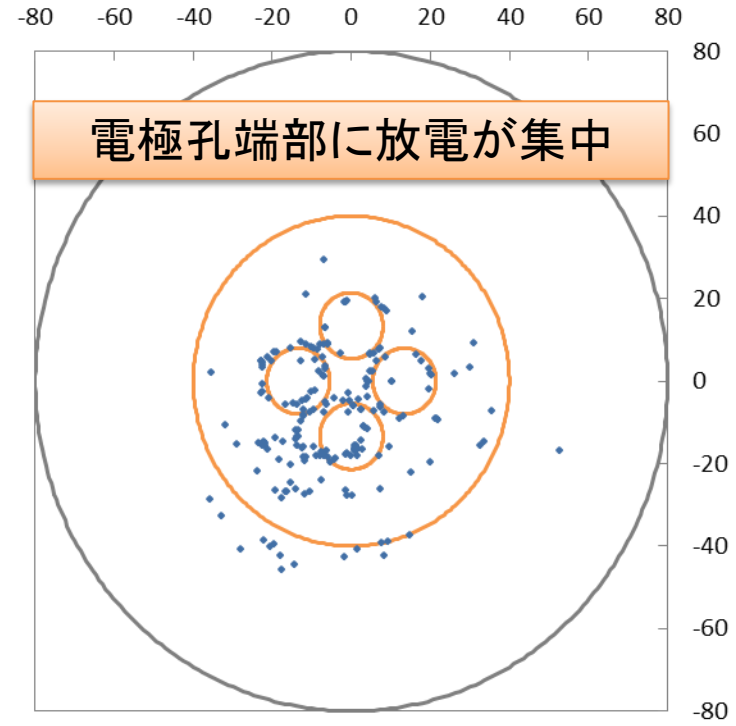


放電時の発光

放電発生箇所



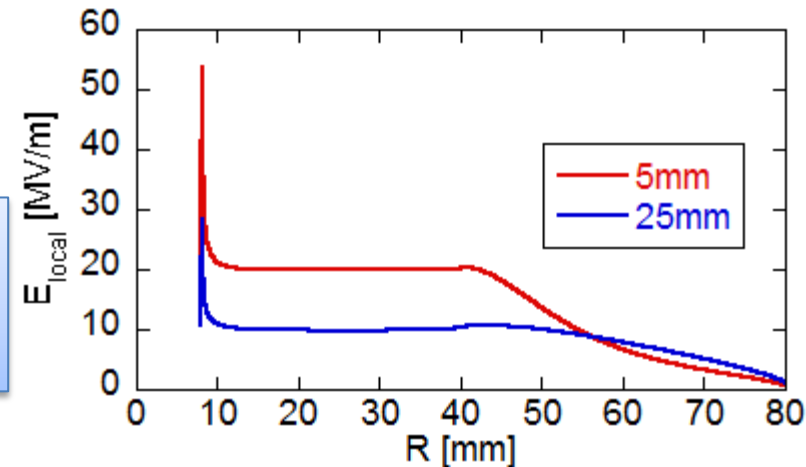
ギャップ長5mm



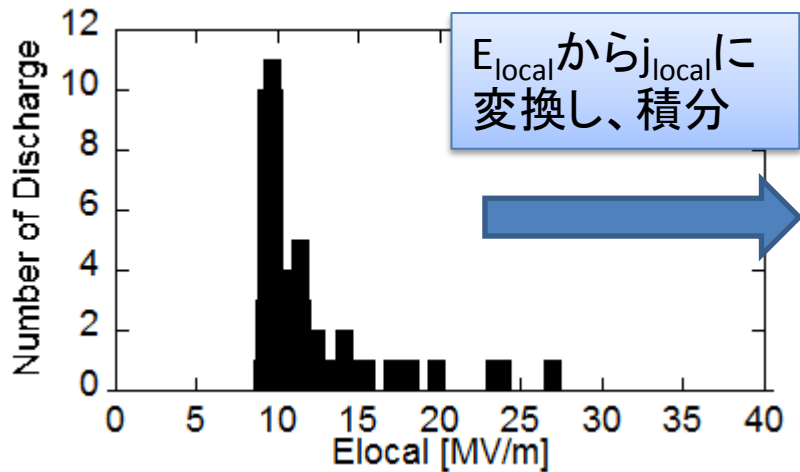
ギャップ長25mm

ギャップ長が長くなると電極孔周辺部での放電が増加

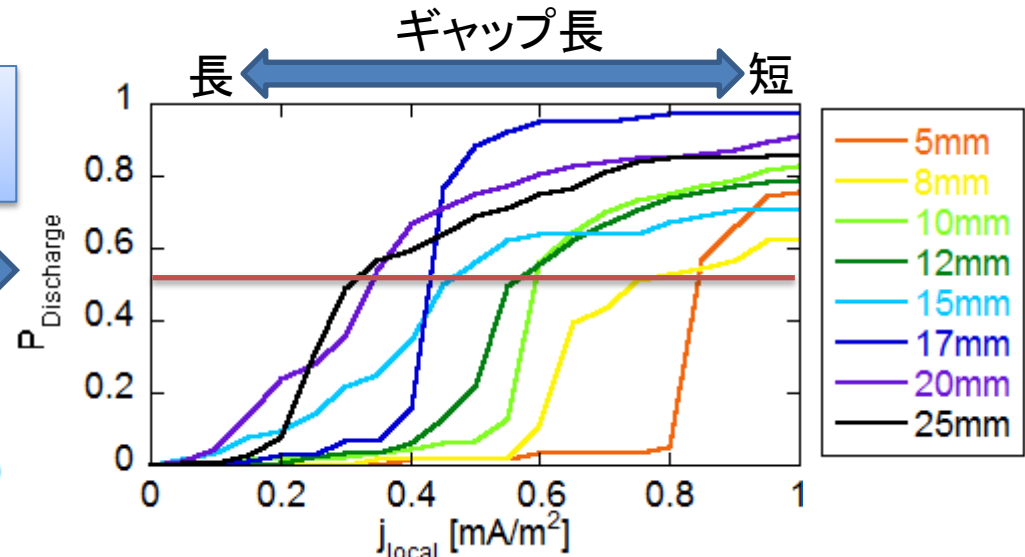
短ギャップでは電極孔周辺部だけでなく平坦部の電界も高いために、電極表面のいたるところで放電が発生



放電確率



局所放電電界の放電回数分布
(ギャップ長25mm)



放電確率と局所暗電流密度

ギャップ長25mmのときには局所電界9.6MV/mで放電が多く発生

各ショットの電圧・電流・電界増倍係数を用いて、電界分布から暗電流分布を算出

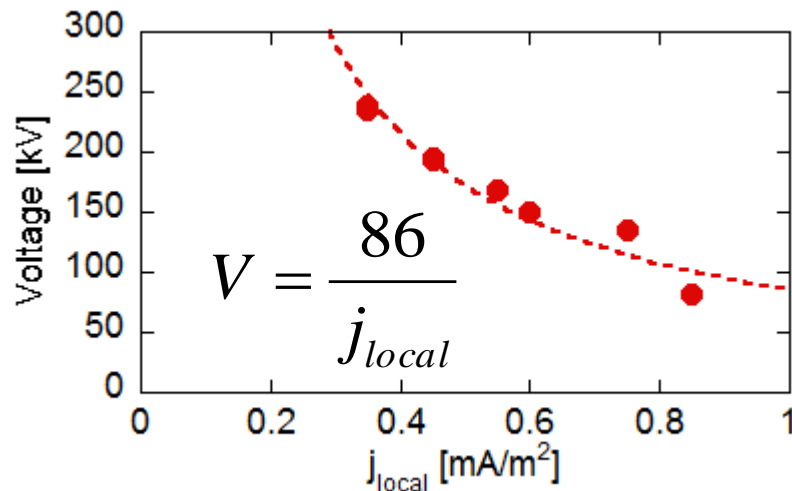


暗電流分布を積分すると、暗電流値になる

放電確率 $P_{Discharge}$ と局所暗電流密度 j_{local} を見ると

ギャップ長が長くなると、50%の確率で放電する暗電流密度が小さくなる

小型電極の放電電圧と局所暗電流密度



50%放電電圧と放電暗電流密度

画像解析: 0.2mm/pixel

これより、 $\Delta S = 0.04$ [mm²]

ΔS に流入するパワーは0.0172W

放電電圧 V と局所暗電流密度 j_{local} の積が一定

$$Vj_{local} = 86 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

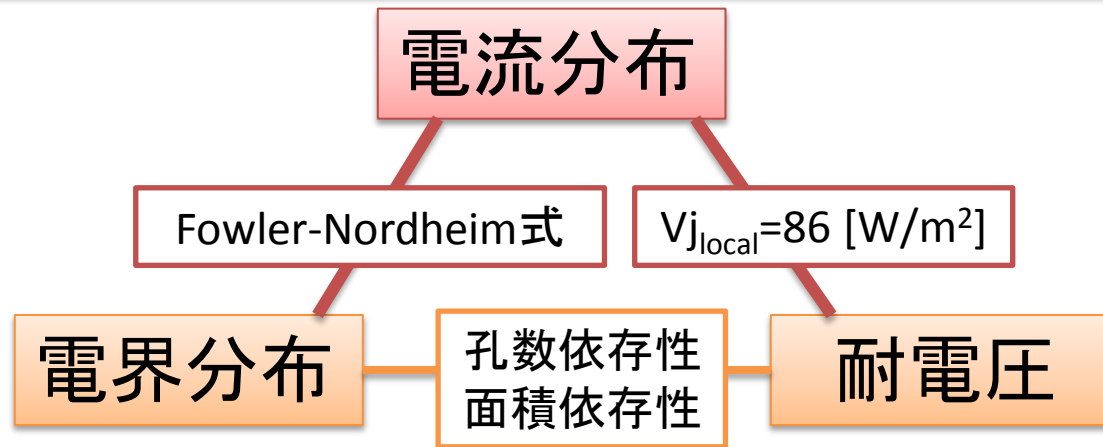
陽極に86W/m²のパワーが流入すると、50%の確率で放電が発生する

86W/m²は金属を溶融させるには小さい暗電流によって、クラumpが放出されているのではないか

このパワーが物理的に何を意味しているのか

陰極から放出される暗電流が放電のトリガーとなっているといえる
そのときの閾値を明らかにした

まとめ



- カソードルミネッセンスを用いて電流分布を観測し、電界分布より暗電流分布を算出する見通しを得た
- 50%の確率で放電する際のパワーを明らかにし、局所暗電流密度を用いて、放電電圧と陰極の電界分布の関係を明らかにした

今後の展望

- 暗電流のパワーの物理的な意味を検討する
- 陽極の電界分布の影響を明らかにする
 - 陰極を孔無し電極、陽極を孔開き電極として実験を行い、放電電圧と陽極の電界分布の関係を明らかにする
 - 孔数や面積が変えることにより、電界分布を変えて実験を行う