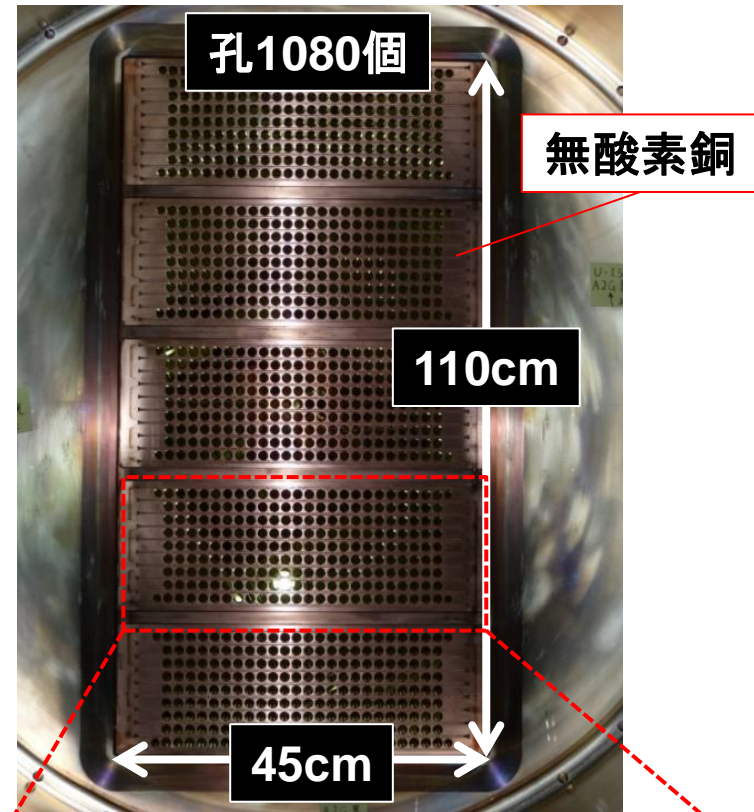
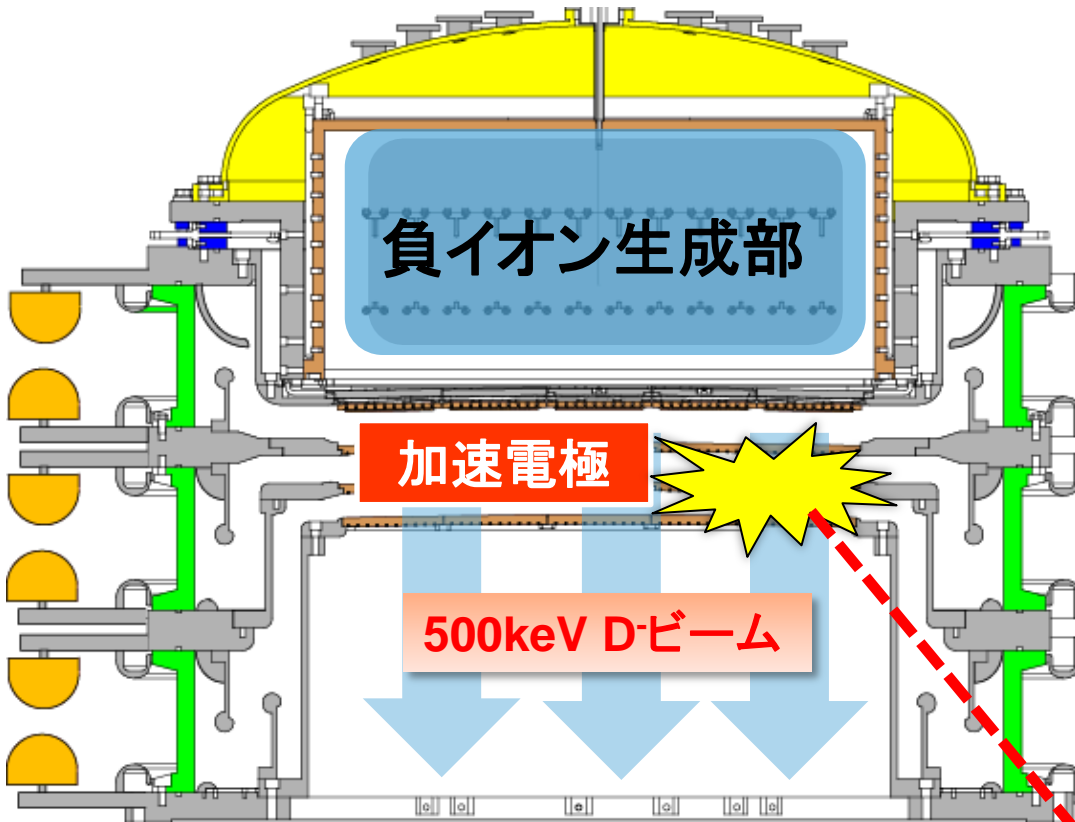


# 真空中における小型孔開き電極の絶縁破壊 電界及び電界増倍係数の孔数依存性

Dependence of vacuum electrical breakdown field and field enhancement factor  
on the number of apertures drilled in small electrodes

石田 諒\*，山納 康，小林 信一（埼玉大学）  
花田 磨砂也，小島 有志（日本原子力研究開発機構）  
齊藤 芳男（高エネルギー加速器研究機構）

# 研究背景 ～JT-60負イオン源の耐電圧制限～

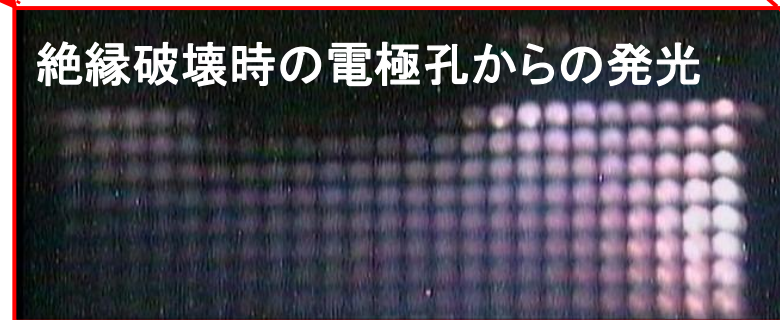


加速部に高電圧印加

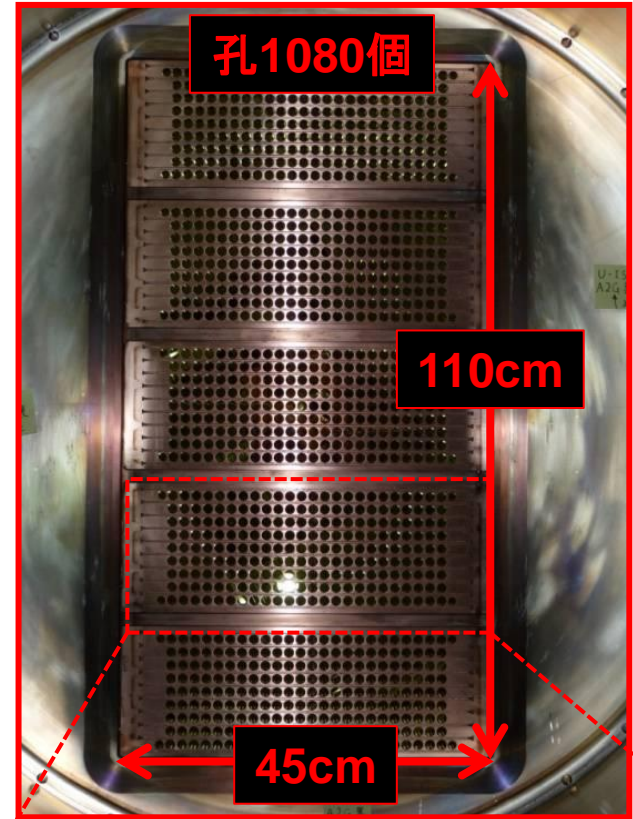
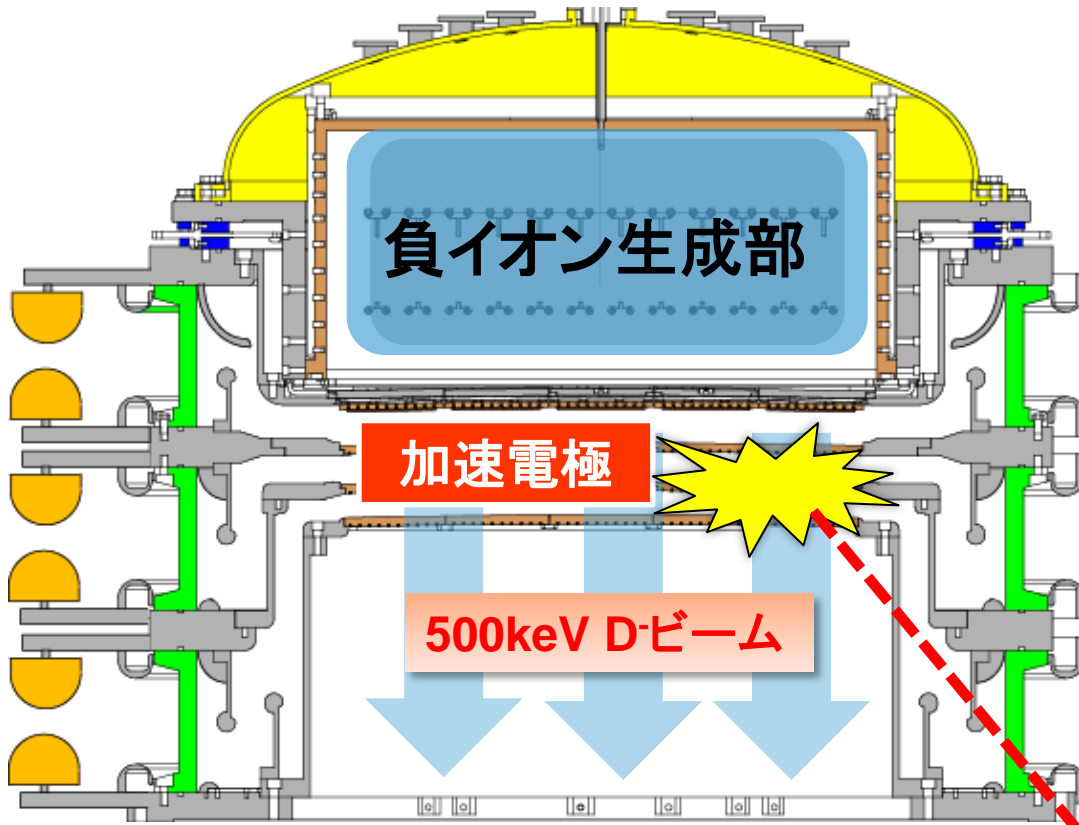


加速電極において真空中絶縁破壊発生  
(ビーム性能を制限する主要因)

絶縁破壊時の電極孔からの発光



# 研究背景 ～JT-60負イオン源の耐電圧制限～

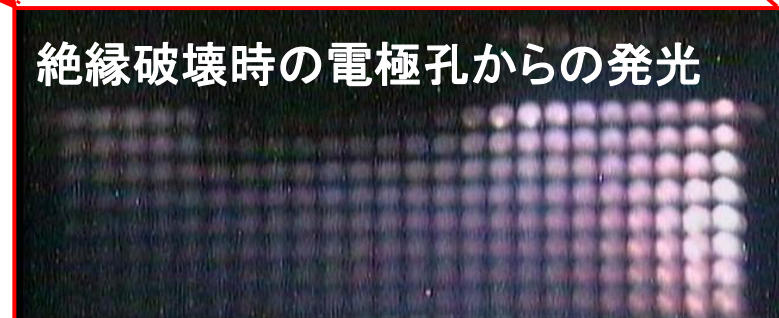


□ 多くの孔を有する複雑かつ大面積な電極の絶縁破壊特性や絶縁破壊機構は不明



JT-60SAやITERへ向けて説明が必要

絶縁破壊時の電極孔からの発光



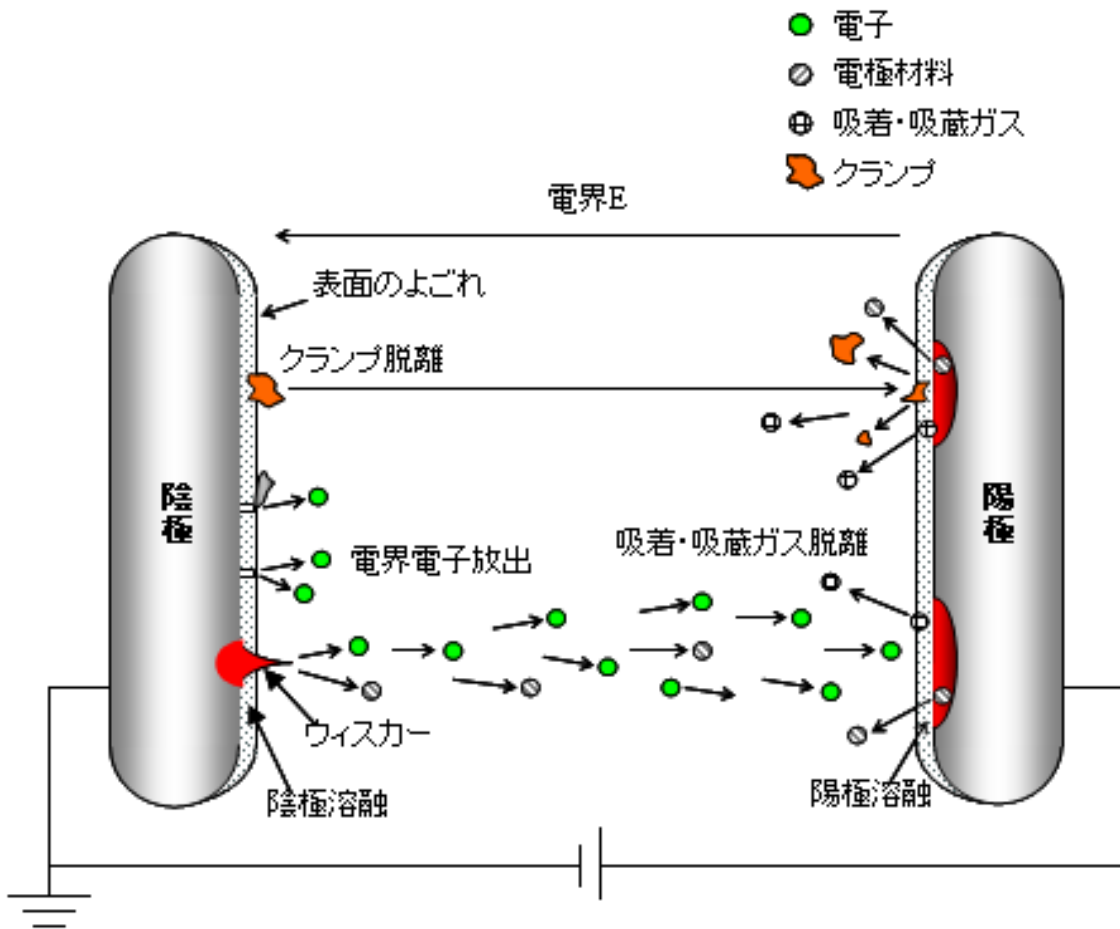
# 真空中絶縁破壊の要因

## 陽極表面

- ・電子衝撃脱離
- ・電子衝撃による加熱  
⇒陽極加熱説
- ・クランプ(微粒子)の放出や衝突

## 陰極表面

- ・電界電子放出
- ・電子放出電流によるジュール加熱  
⇒陰極加熱説
- ・二次電子放出
- ・クランプ(微粒子)の放出や衝突



絶縁破壊機構モデル図

# 先行研究

- 花田氏、小島氏 (JAEA)、アマド氏 (埼玉大) ら  
— 多孔電極の電界分布と真空耐電圧の関係を調査<sup>[1]</sup>

⇒耐電圧は { 孔数が多いほど  
電界積分値 (∫孔周りの電界分布) が大きいほど 低くなる

高電界領域の暗電流:

平等電界領域と比べて10~15倍  
の電流密度<sup>[1]</sup>

暗電流が絶縁破壊の引き金?

孔数, 局所電界

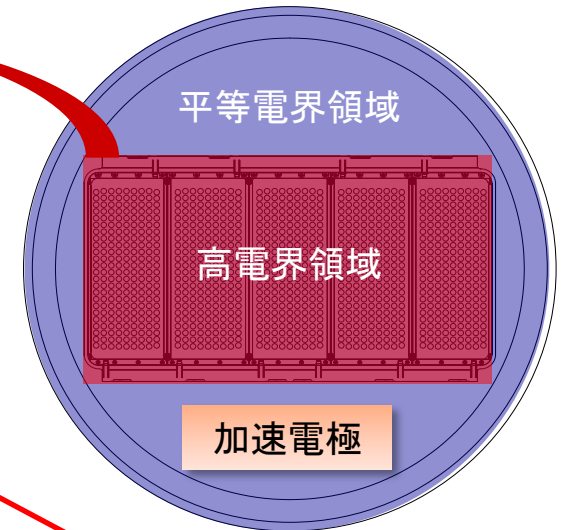
電界分布

因果関係はよく  
分かっていない

電流

暗電流

耐電圧



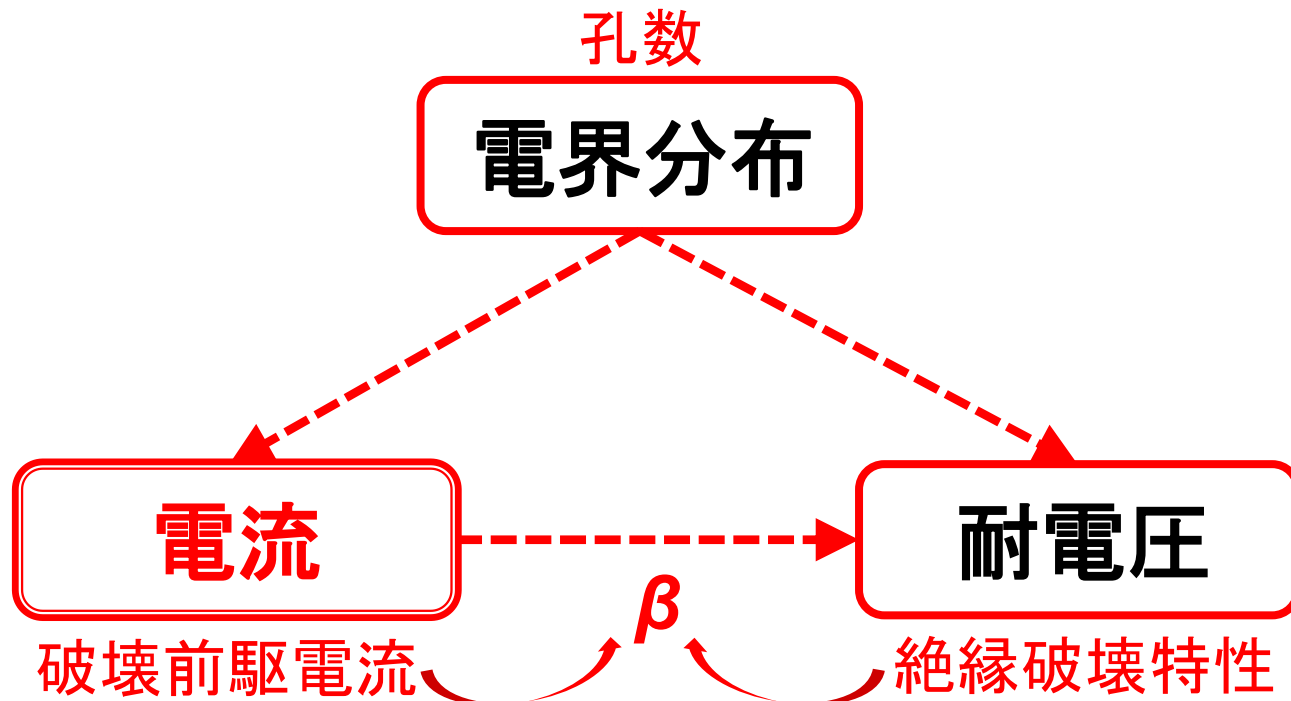
[1]A. Kojima, M. hanada, T. Inoue, NB Heating Technology Group, Y. Yamano, S. Kobayashi : "Voltage Holding Capability of Large-Size Acceleration Grid with Multiple-Apertures and Multiple-Stage for Negative Ion Source", J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 56, p.502-506 (2013)

# 目的

- 本研究・・・多孔電極の絶縁破壊を決定しているパラメータの一つとして考えられる電界増倍係数 $\beta$ に着目

- 絶縁破壊試験時に観測される暗電流(破壊前駆電流)をFowler-Nordheim(F-N)理論に基づいて解析することで絶縁破壊毎の電界増倍係数を算出→数パターンの孔数で取得

コンディショニング過程における絶縁破壊電界 $E_b$ と電界増倍係数 $\beta$ の関係及び両特性の孔数依存性について調査, 検討

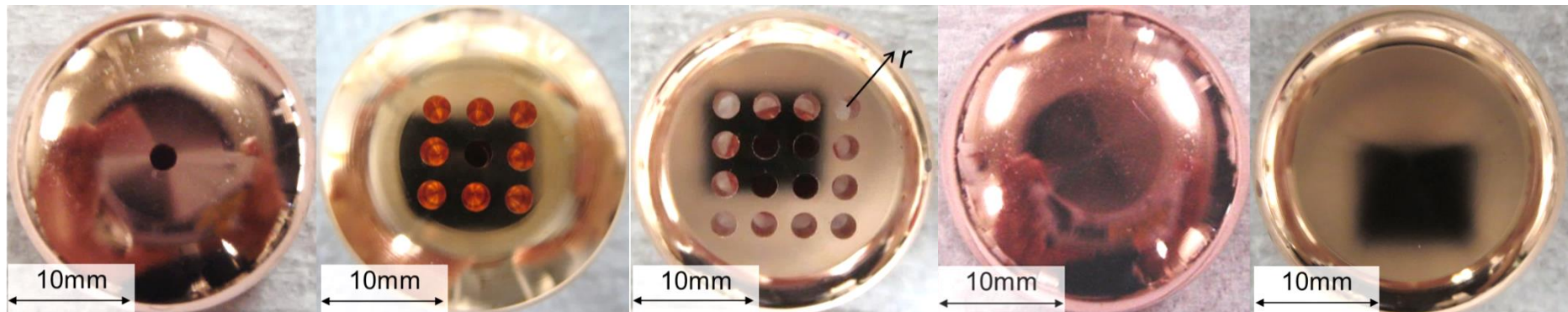


# 供試電極

- 直径25mmのJIS規格C1020無酸素銅電極
- ダイヤモンドターニングにより切削加工(表面粗さ:~0.5 $\mu$ m)

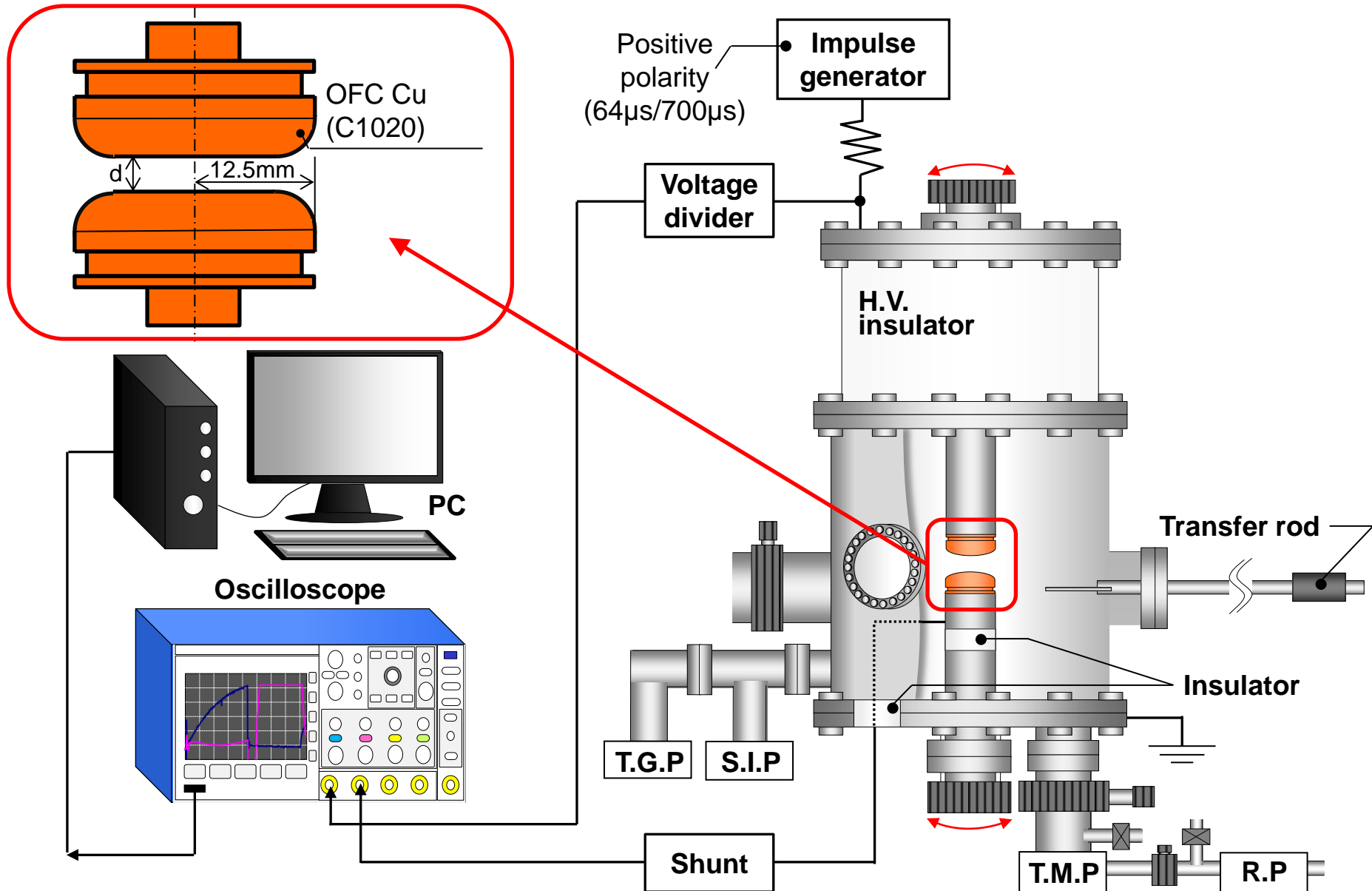
試料電極の形状及び保管条件

Number of apertures	0		1	9	16
Diameter of flat portion [mm]	9	17	9	10.6	17
Area of flat portion [mm <sup>2</sup> ]	63.6	227	60.5	59.8	176.7
Radius of curvature R [mm]	12(inside)	4	12(inside)	12(inside)	4
Storage condition	In nitrogen				
Storage term	1 month	5 months	5 months	1 year and 5months	5 months



電極写真

# 実験装置(絶縁破壊試験)

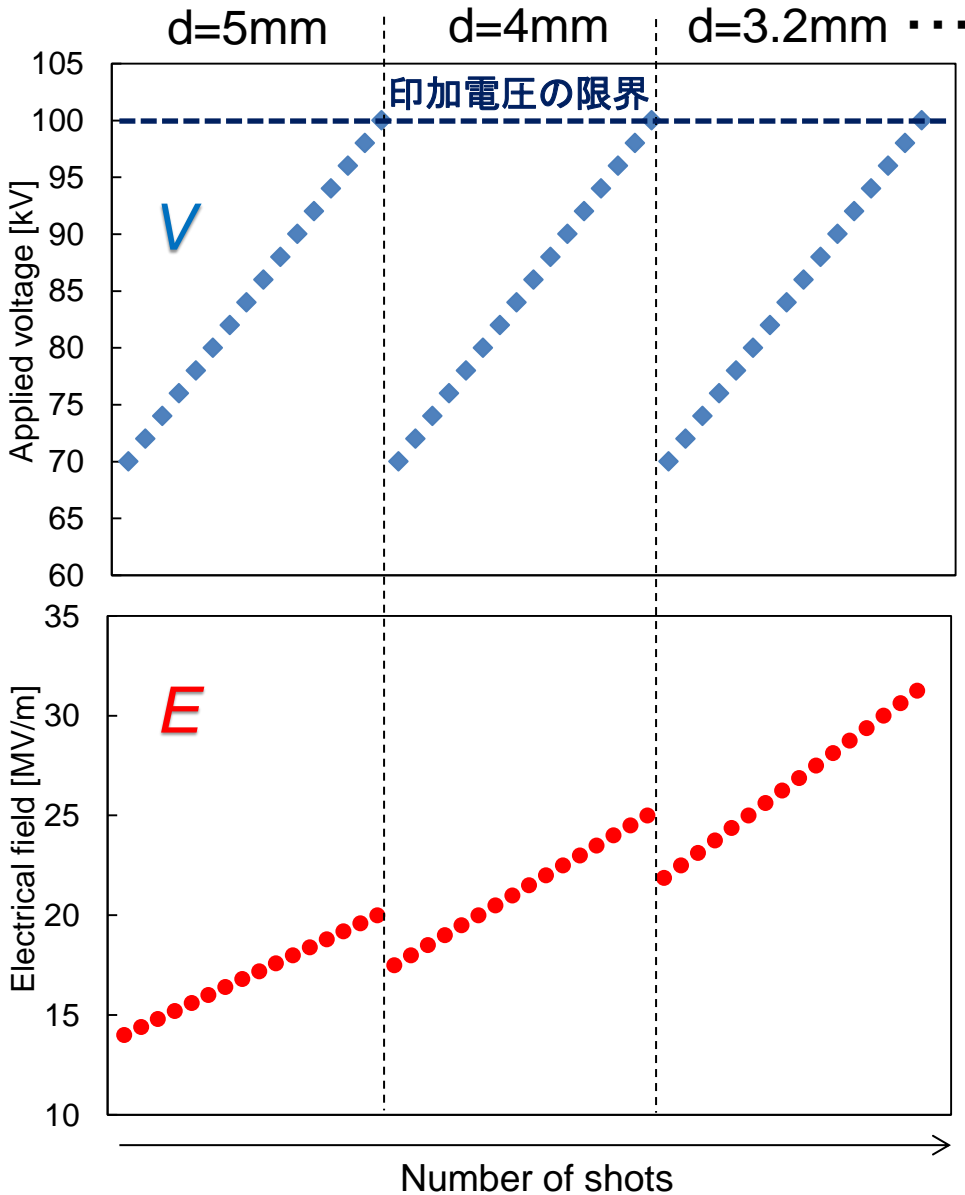
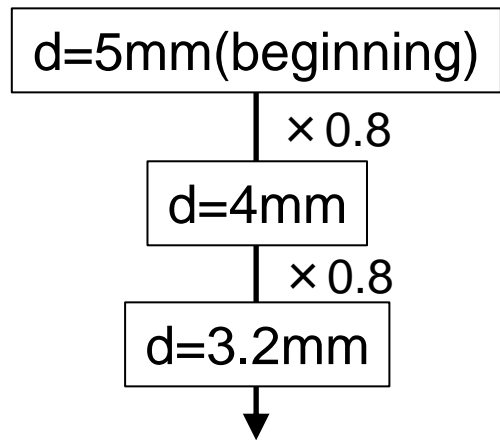
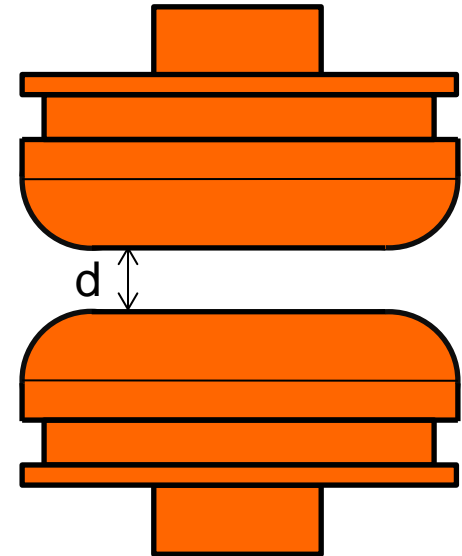


Vacuum chamber for BD experiment ( $\approx 10^{-7}\text{Pa}$ )



# 実験方法(絶縁破壊試験)

印加電圧を変える条件  
同印加電圧で5回連続放電が発生しない

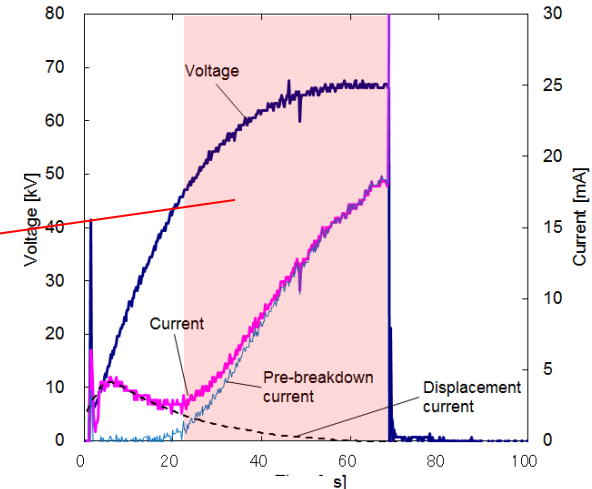
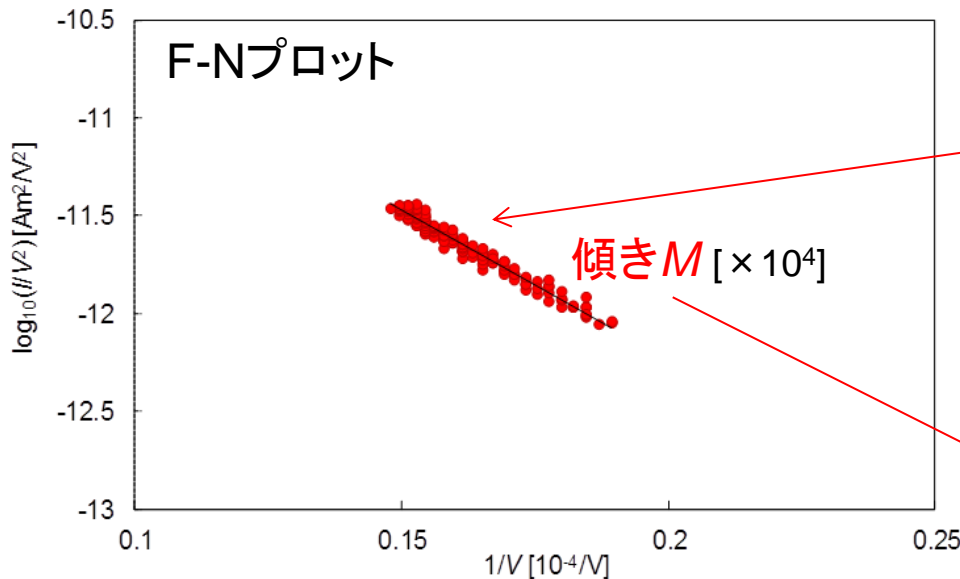


# $\beta$ 及び $\beta E_b$ の算出

**$\beta$ : 電界増倍係数**・・・大きいほど電子放出しやすい

(表面が純金属の場合⇒絶縁破壊箇所の金属突起における電界増倍を表す)

ex. コンディショニング終了後の金属表面



**$\beta$ の理論式[2]**

$$\beta = -\frac{2.84 \times 10^9 \varphi^{3/2} d}{M}$$

$\varphi$  : 仕事関数[eV]  
(銅の場合: 4.65eV)  
 $d$  : ギャップ長[m]  
 $M$  : F-Nプロットの傾き

**$\beta \times$  絶縁破壊電界  $E_b =$  実効破壊電界  $\beta E_b$**

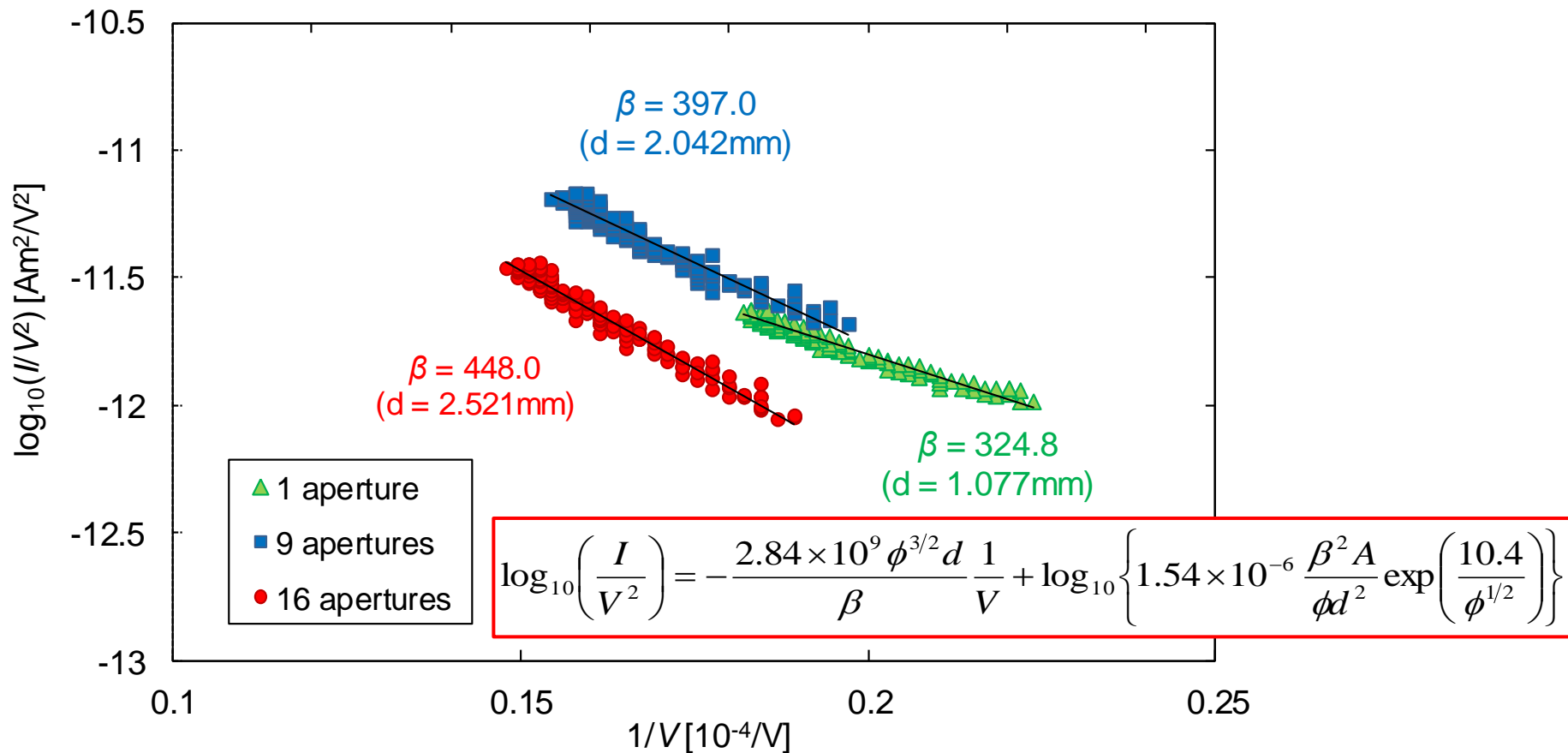
(絶縁破壊箇所の臨界電界)

# $\beta$ 及び $\beta E_b$ の算出

□ 孔開き電極における破壊前駆電流の主成分は何なのか

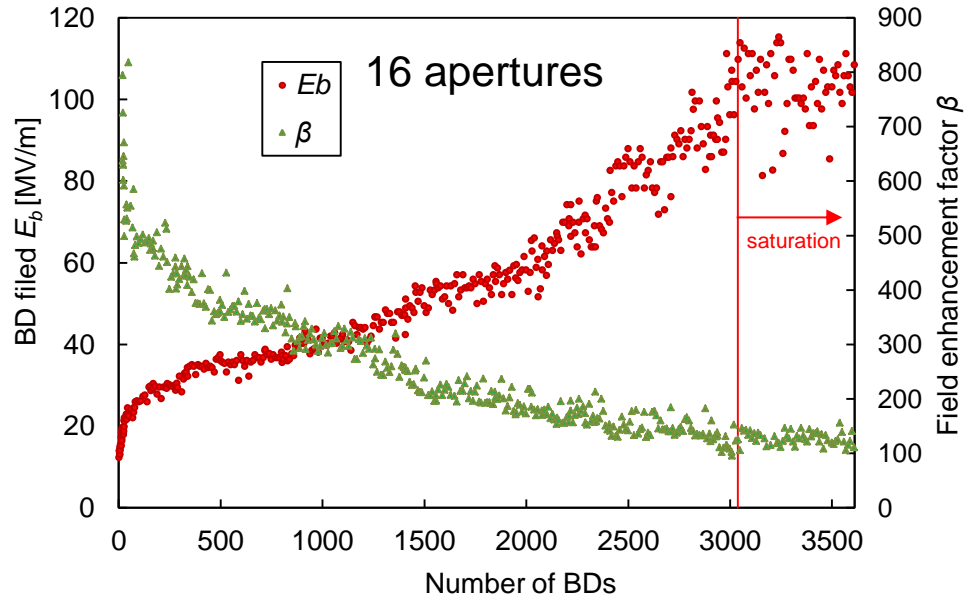
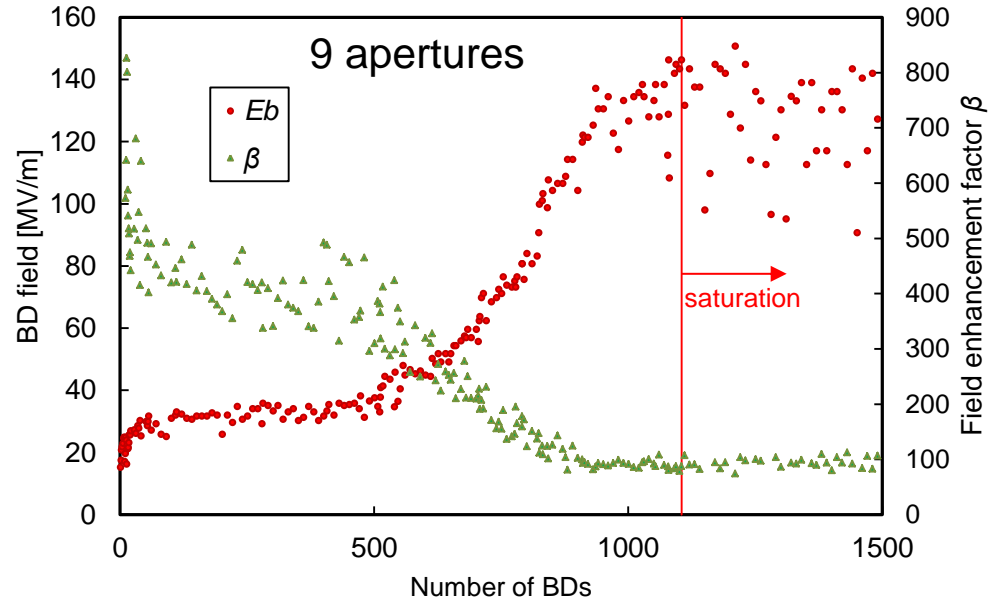
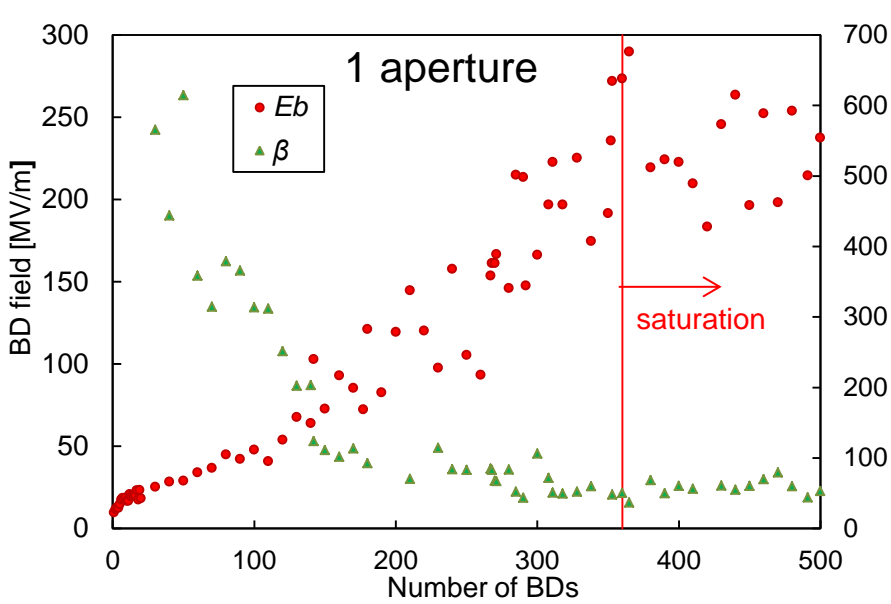
・F-Nプロットは右下がりの直線となっている

→各電極の破壊前駆電流は陰極からの電界電子放出電流である

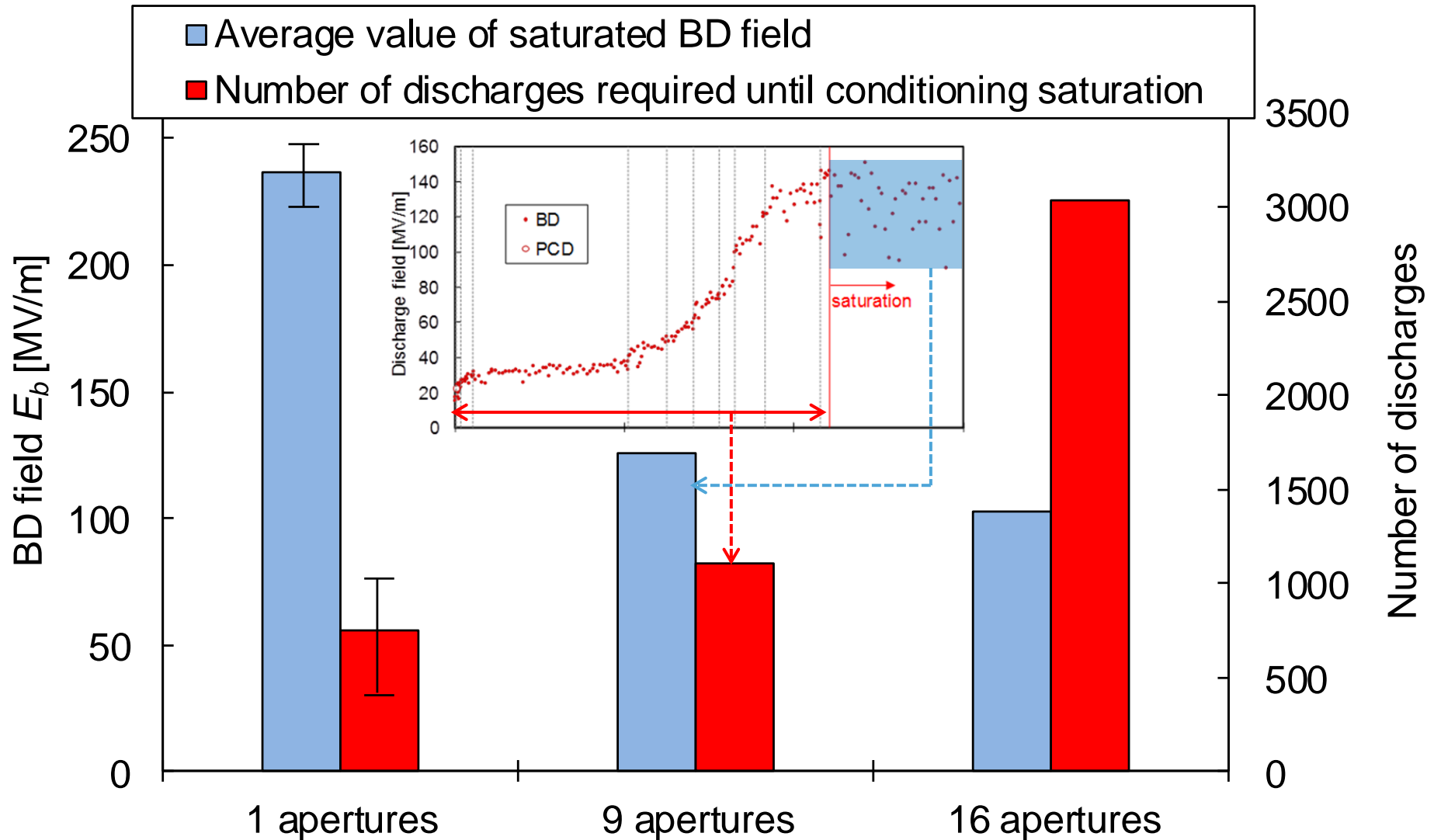


各電極の絶縁破壊100回目におけるF-Nプロット

# コンディショニング過程における $E_b$ 特性及び $\beta$ 特性

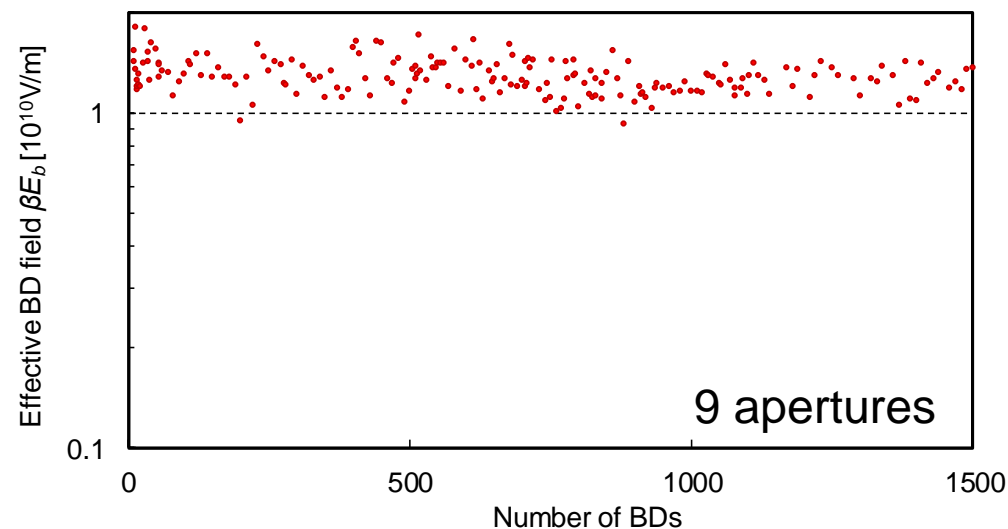
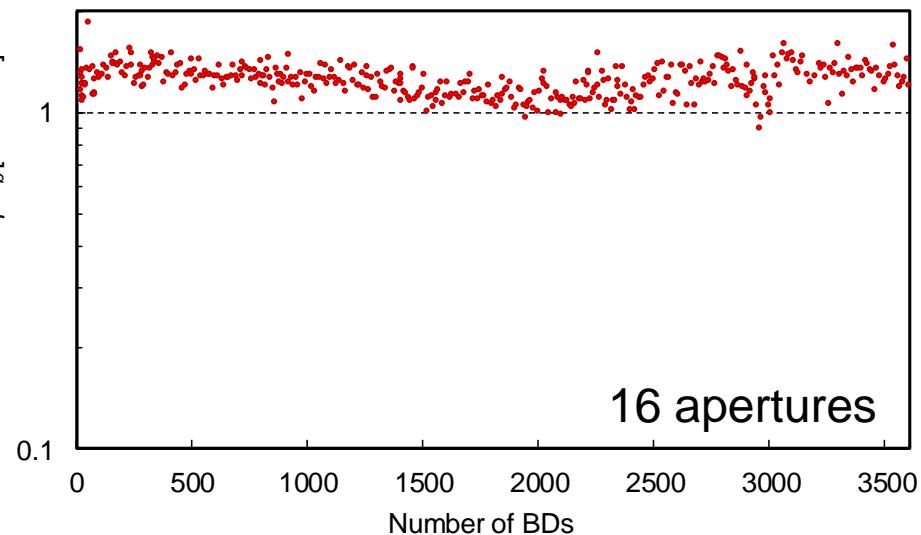
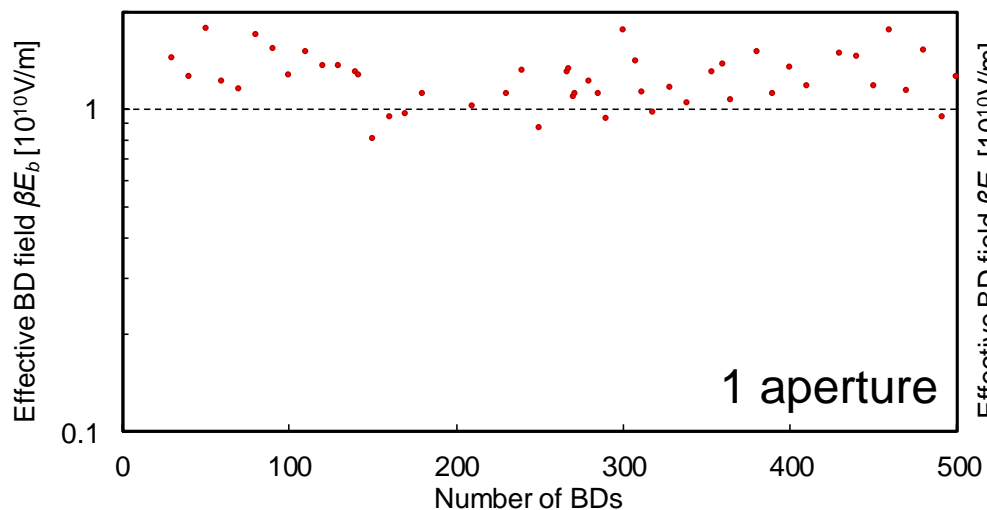


# $E_b$ 特性の比較



孔開き電極におけるコンディショニング飽和後の平均絶縁破壊電界及びコンディショニング飽和に要した放電回数の比較

# コンディショニング過程における実効破壊電界 $\beta E_b$ 特性



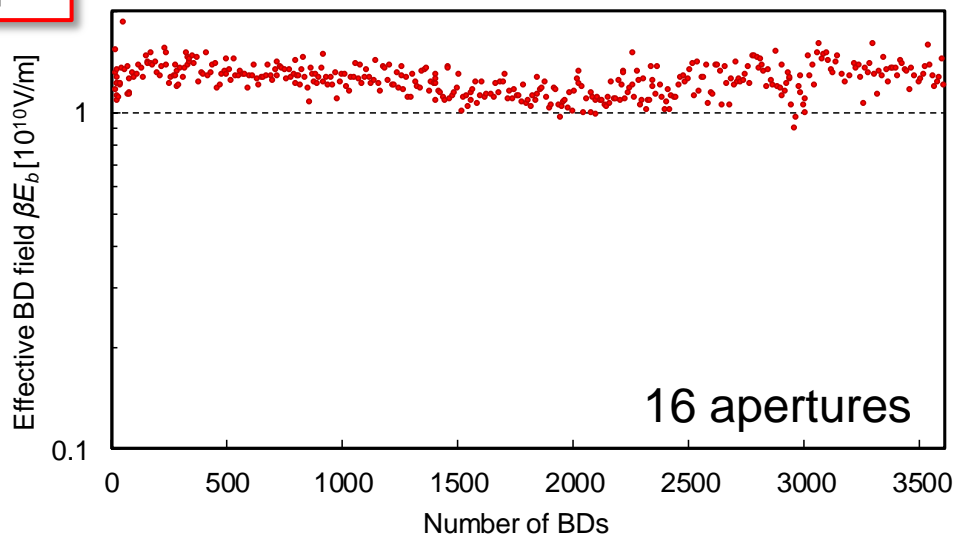
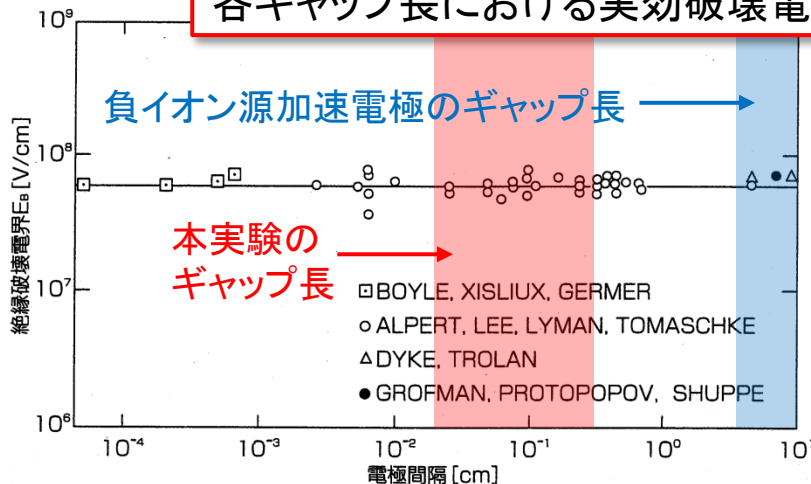
□  $\beta E_b$ は絶縁破壊回数によらずおおよそ  
 $1 \times 10^{10}$  [V/m]オーダの一定値

→  $E_b$ は $\beta$ で決まる

□ 過去の実験結果と類似

# コンディショニング過程における実効破壊電界 $\beta E_b$ の推移特性

各ギャップ長における実効破壊電界<sup>[3]</sup>



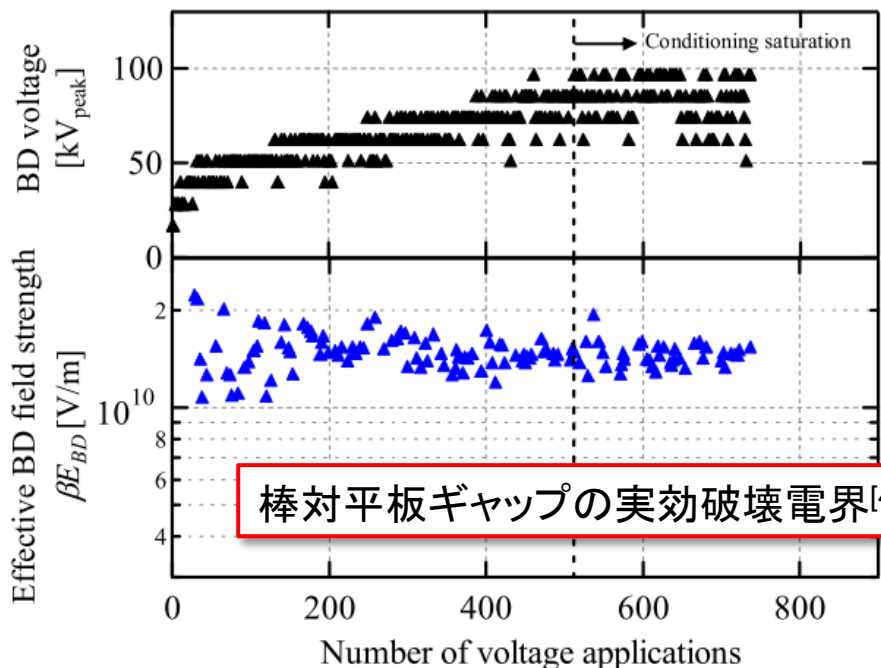
□  $\beta E_b$ は絶縁破壊回数によらずおおよそ  $1 \times 10^{10}$  [V/m]オーダの一定値

→  $E_b$ は $\beta$ で決まる

□ 過去の実験結果と類似

→ 負イオン源の多孔電極でも同程度の実効破壊電界である可能性がある

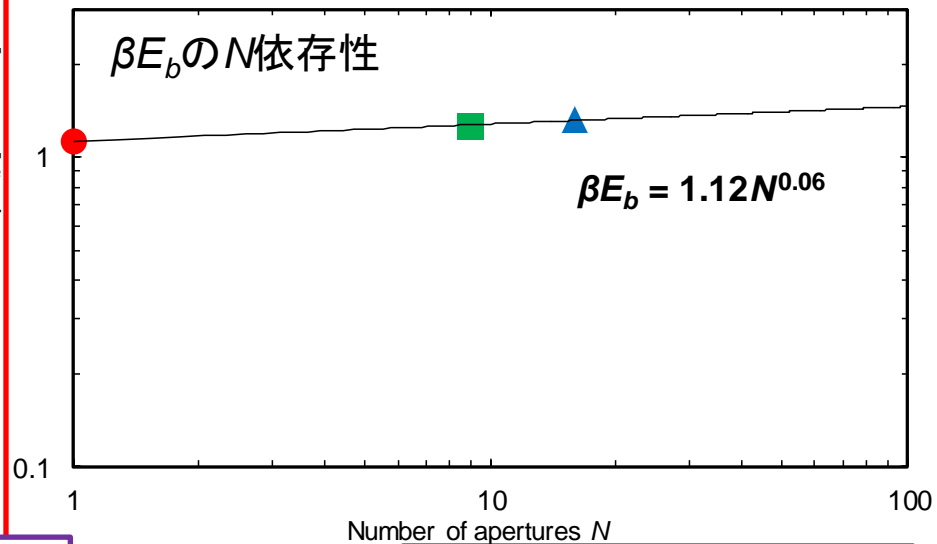
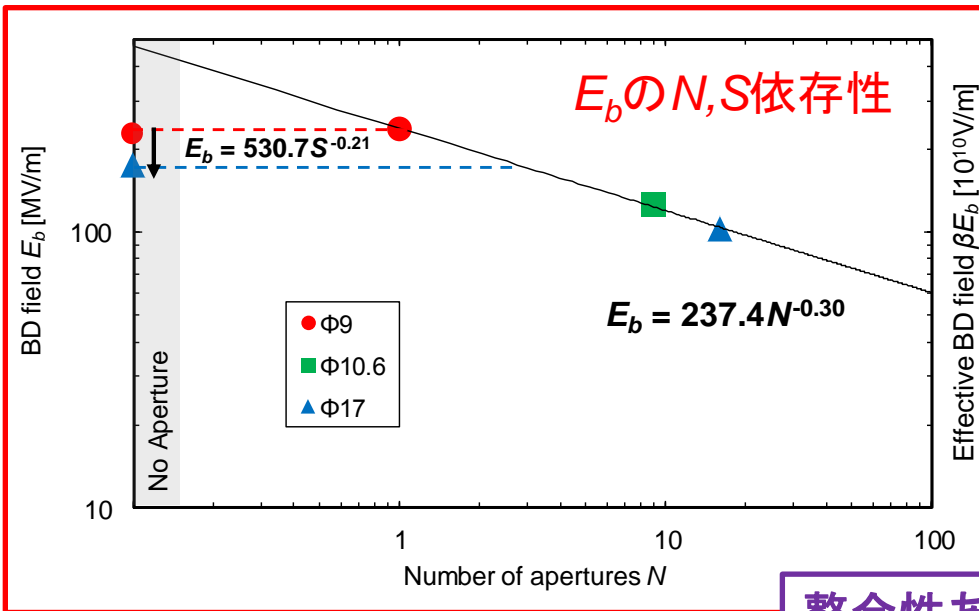
棒対平板ギャップの実効破壊電界<sup>[4]</sup>



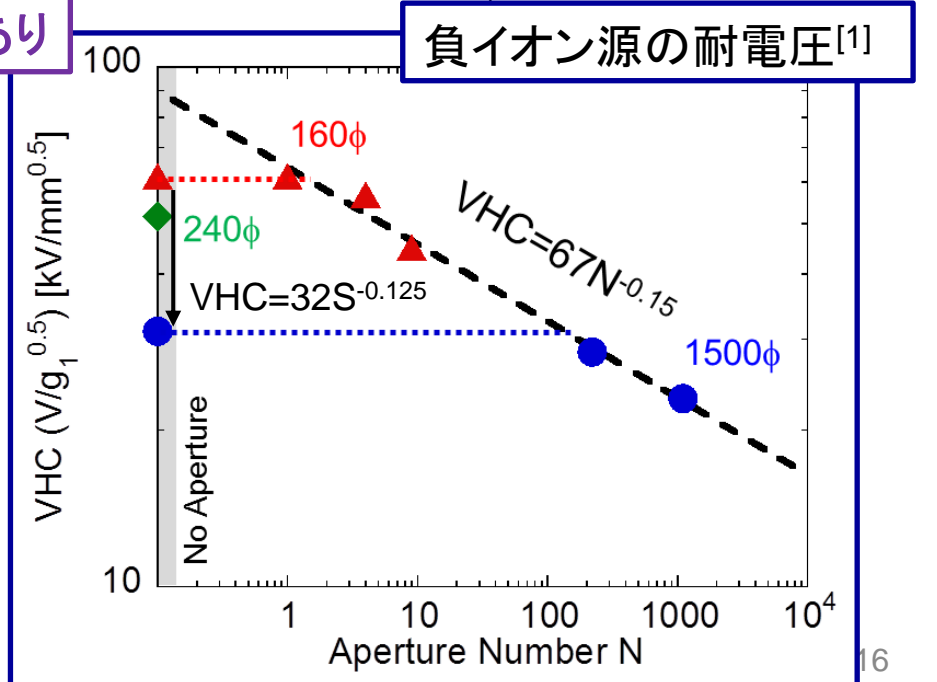
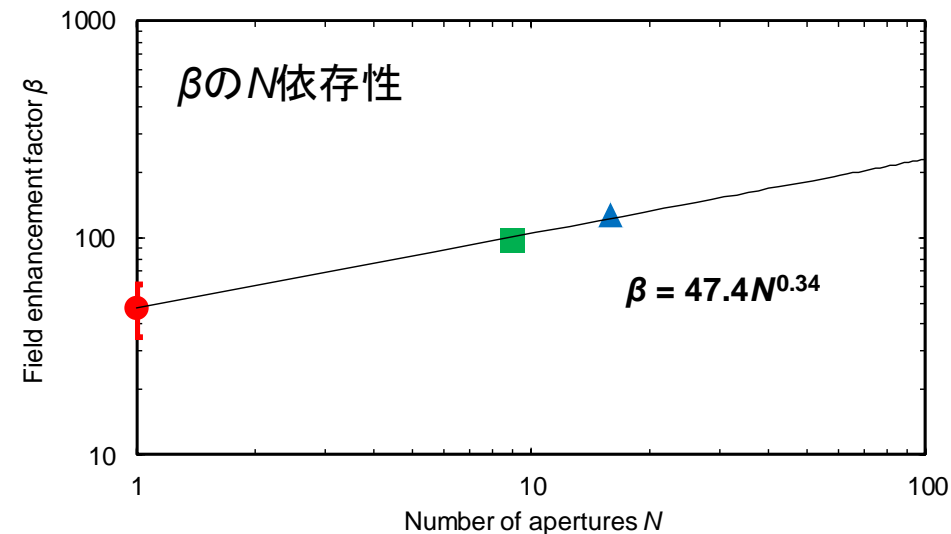
[3]「放電ハンドブック 上巻 気体・プラズマ」, オーム社, p.304(1998)

[4]加藤, 安岡, 加藤, 大久保:「電極コンディショニングを考慮した真空中不平等電界下の電極面積効果」, IEEJ研究会資料, ED-08-45, pp.1-6(2008)

# 孔開き電極における各特性の孔数(N)依存性

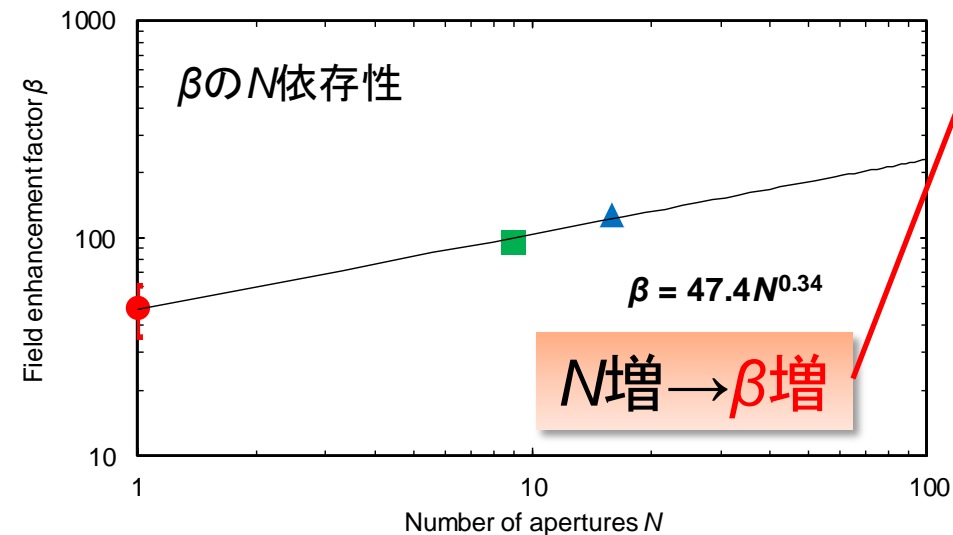
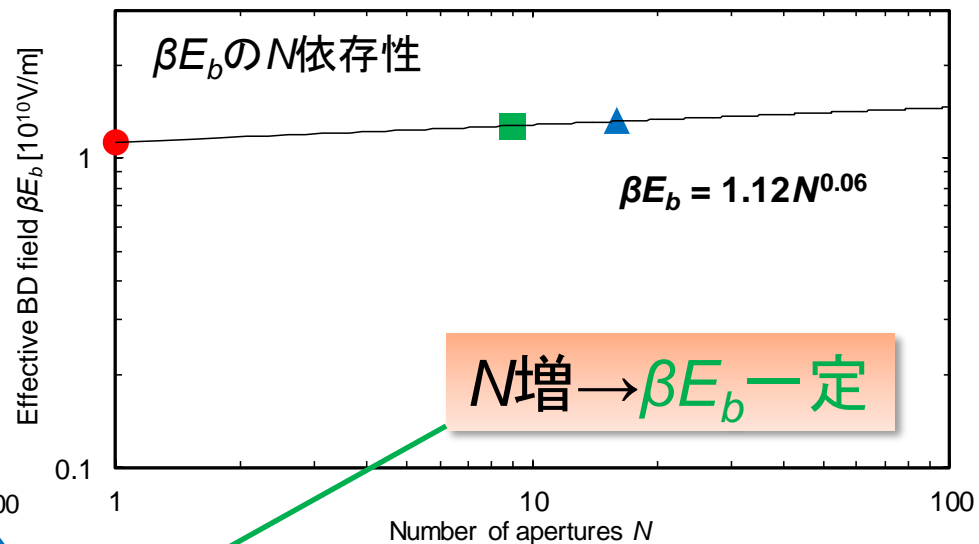
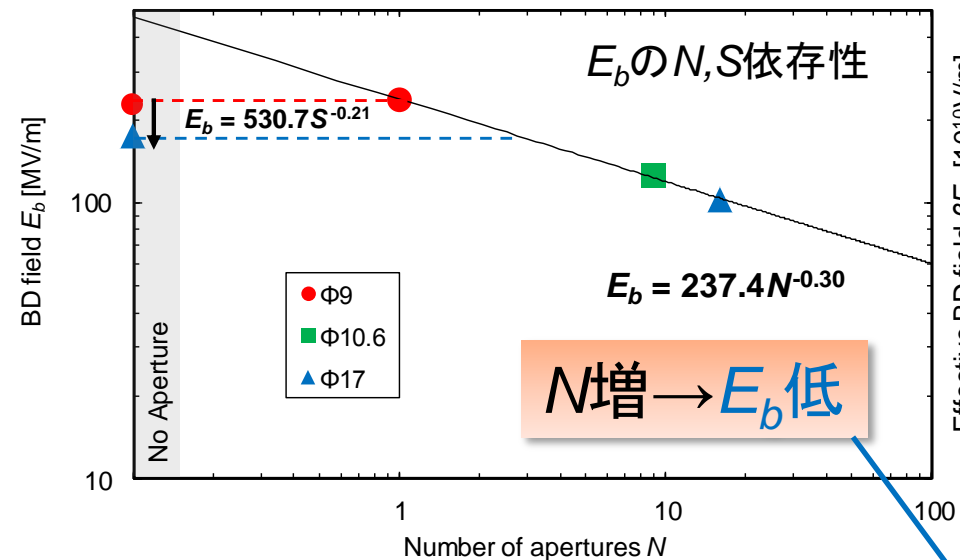


整合性あり

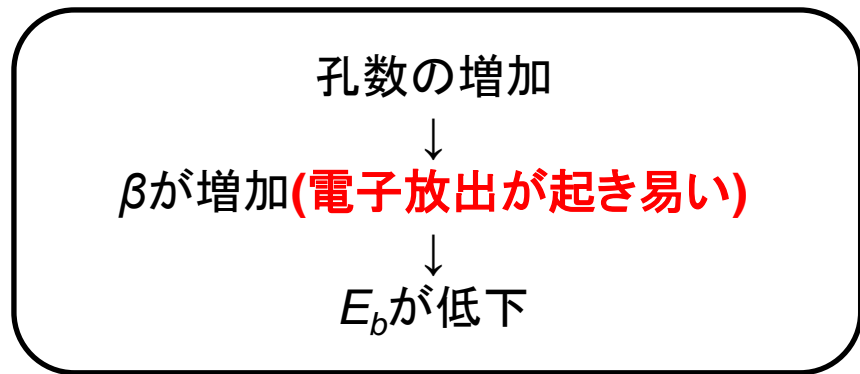




# 孔開き電極における各特性の孔数( $N$ )依存性



□ 孔数増加に伴う最終的な $E_b$ の低下  
 ... 電界増倍係数 $\beta$ の増加に起因



# まとめ

- 孔数の異なる小型電極の $E_b$ 特性を取得すると共に、測定した破壊前駆電流より各電極のコンディショニング過程における $\beta$ の推移を求め、 $\beta$ と $E_b$ の関係及びこれらの特性と孔数( $N$ )との関係を調査し、以下の結果を得た。

