

# 局所電界による真空中の絶縁破壊

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科  
小林・山納研究室

中野修輔

指導教員

埼玉大学 小林信一 教授 山納康 准教授  
日本原子力研究開発機構 花田磨砂也氏 小島有志氏 田中豊氏

## 内容

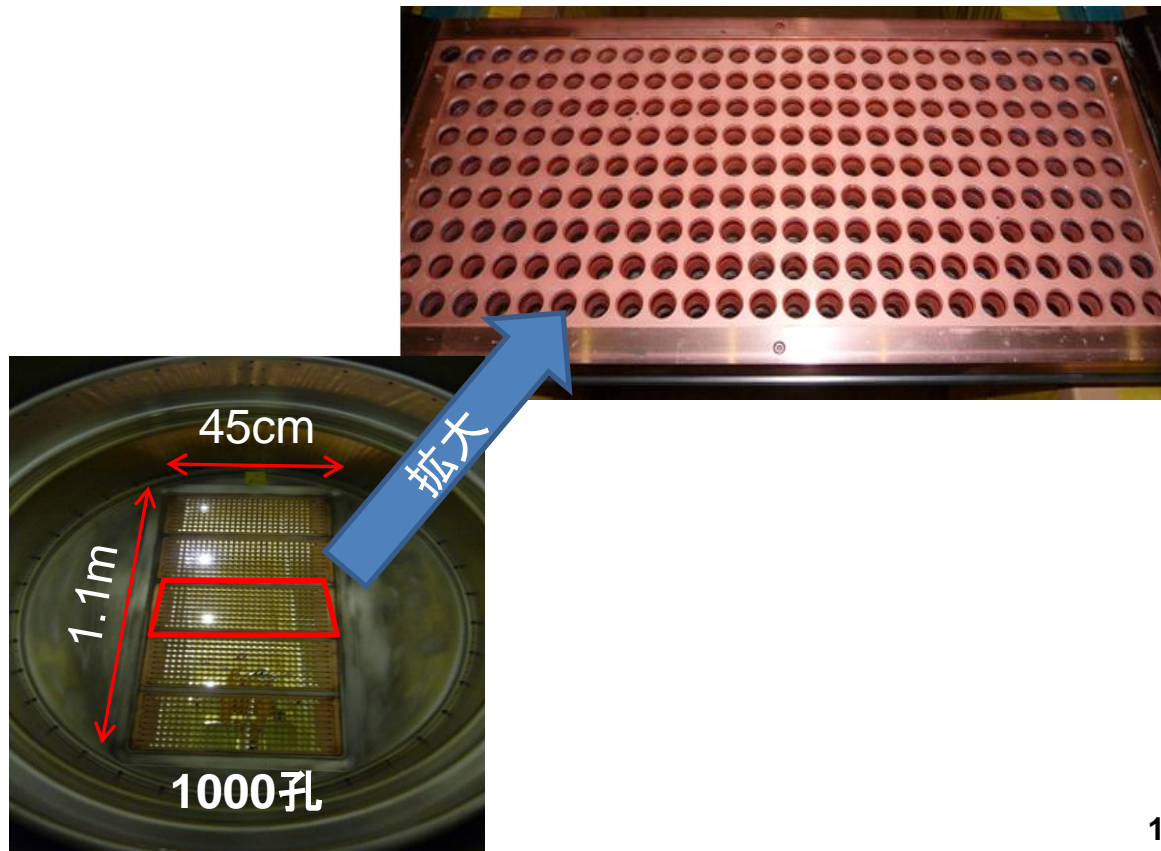
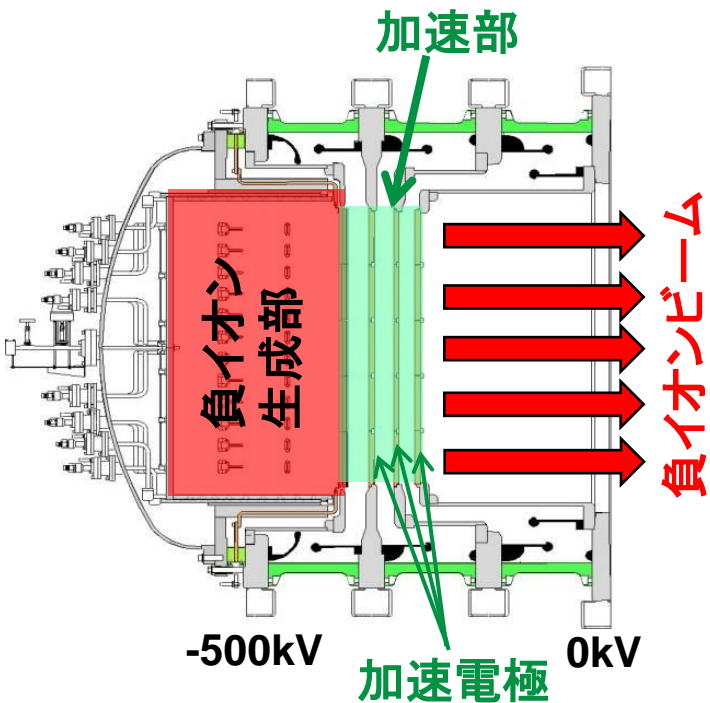
- ◆負イオン源の耐電圧研究の概要
- ◆局所電界を有する電極を用いた耐電圧試験

## 【背景・目的】

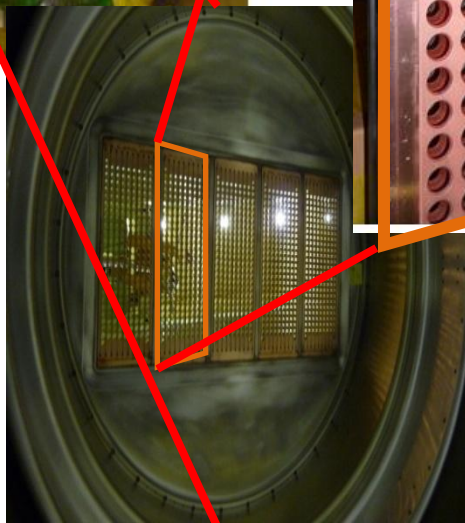
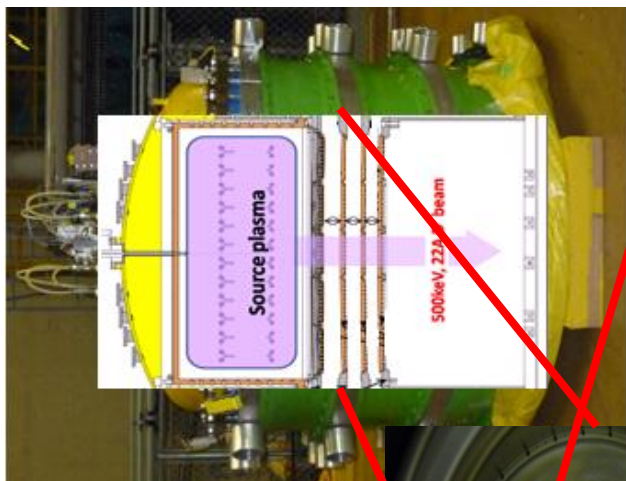
日本原子力研究開発機構では、核融合炉の実現に向けて、大型負イオン源の開発を行っており、負イオン源加速電極間の真空耐電圧(500kV)改善が課題となっていた。昨年、電極間距離の伸長により、目標の500kVを達成した。しかし、ギャップ間距離を伸張することはビーム工学上限界があり、極力ギャップ長を広げない形での耐電圧向上が望まれている。そこで、加速電極に存在する、孔周辺部の局所的に高い電界と耐電圧との関係に注目し、局所的に高い電界を緩和することによる耐電圧向上を目的に、孔開き小型試験電極を用い、耐電圧試験を行った。

## 負イオン源

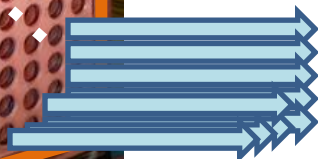
## 加速電極



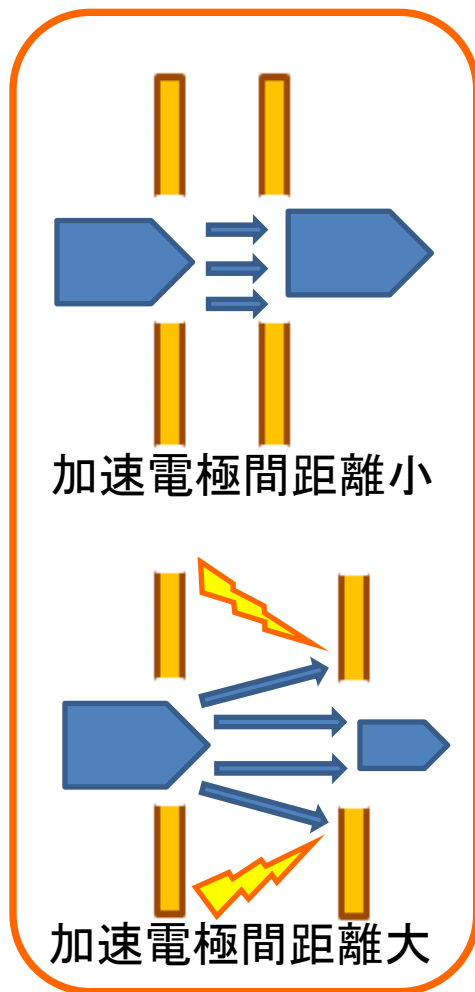
実機負イオン源



加速電極



負イオンビーム



加速電極間距離小

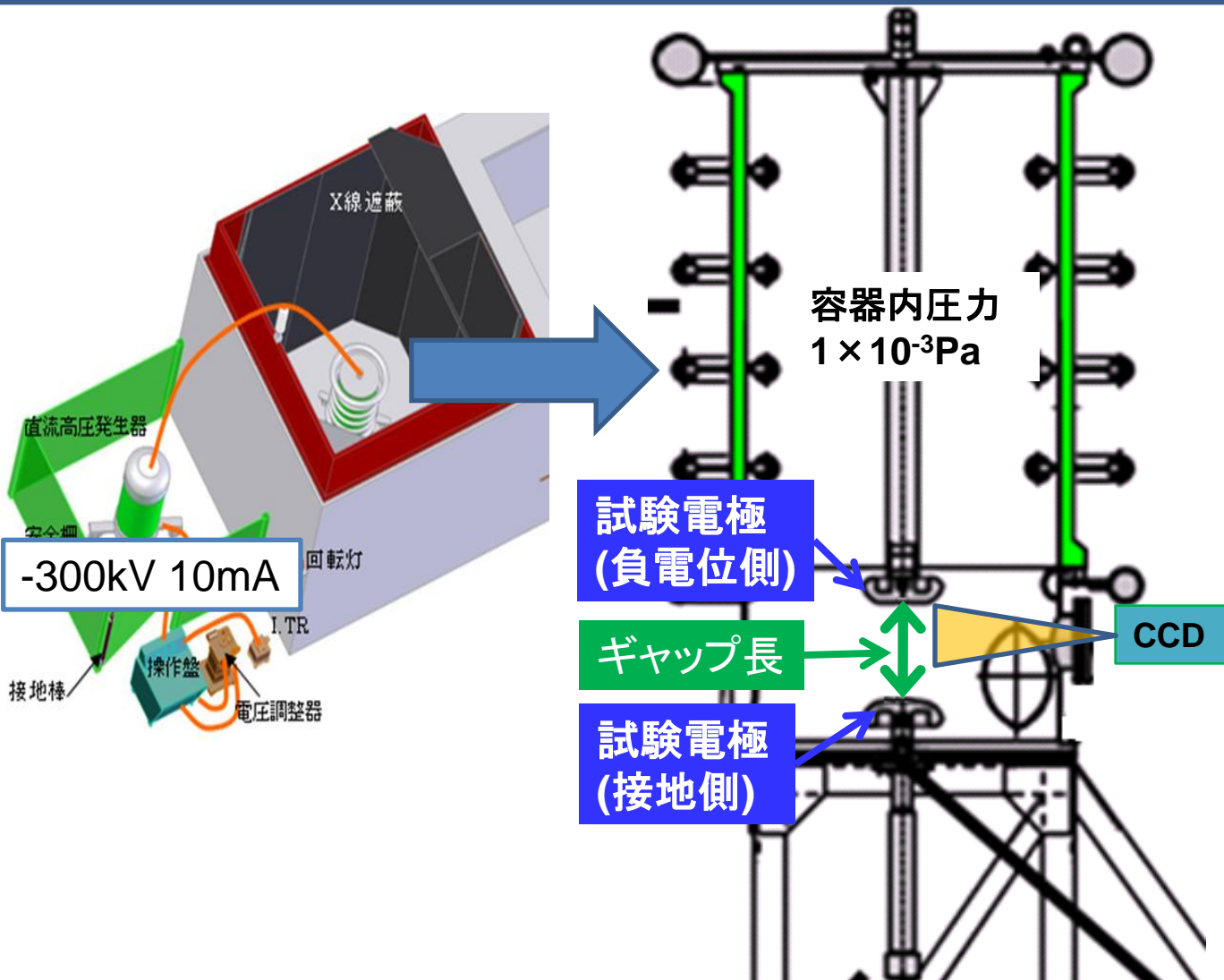
加速電極間距離大

ビーム通過時イメージ図

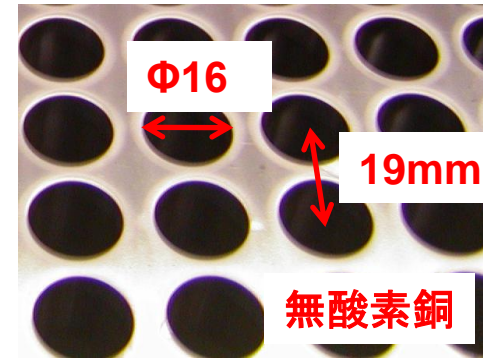
ギャップ長を伸ばさずに耐電圧を向上させたい。

孔周囲の局所的に高い電界と耐電圧の関係解明により、今後の耐電圧設計に活かす。

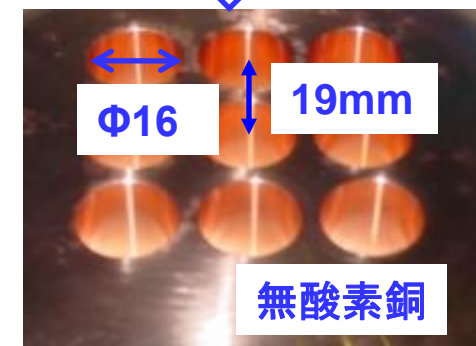
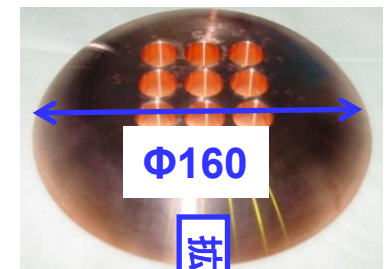
# 試験装置



## イオン源加速電極



## 試験電極



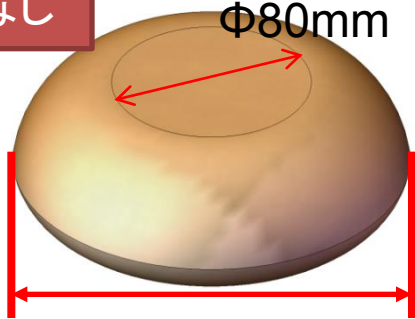
- ・日本原子力研究開発機構において、耐電圧試験装置(最大電圧-300kV,最大電流 10mA)で実験を実施。
- ・実験では、イオン源加速電極と同じ孔直径・孔間距離の試験電極を使用。



# 試験電極と電界分布

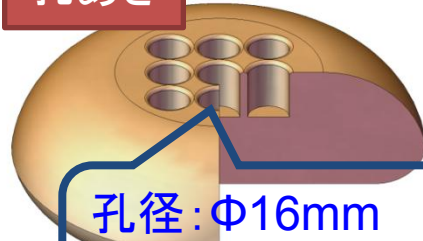
孔なし

電極平坦部  
Φ80mm



Φ160mm

孔あき



孔径: Φ16mm

孔間距離: 19mm

断面図

本試験では  
R=0.2mm, R=0.5mm,  
R=1.5mm,  
面取り0.2mmを使用



曲率半径R

0.2mm

0.2mm

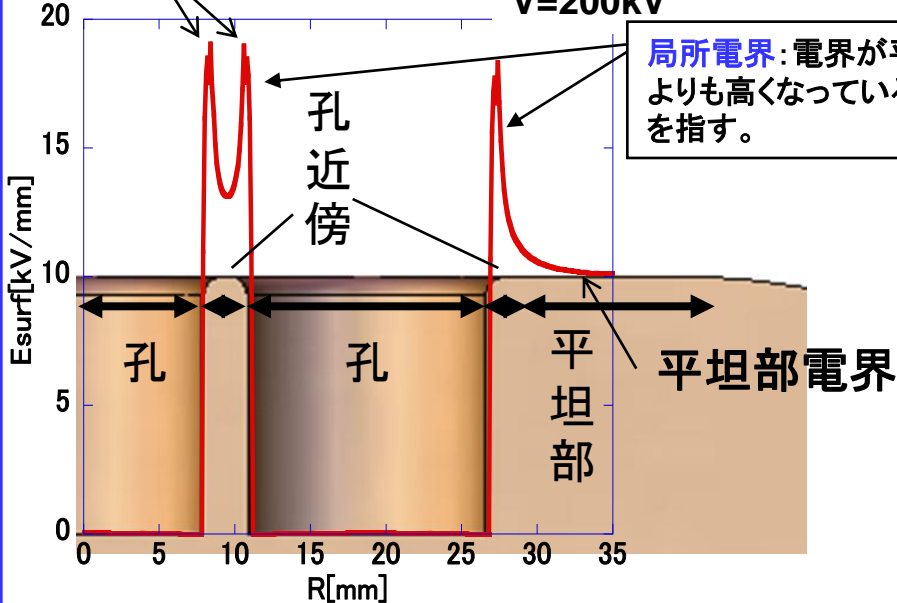
面取り  
0.2mm

## 孔周囲の電界強度

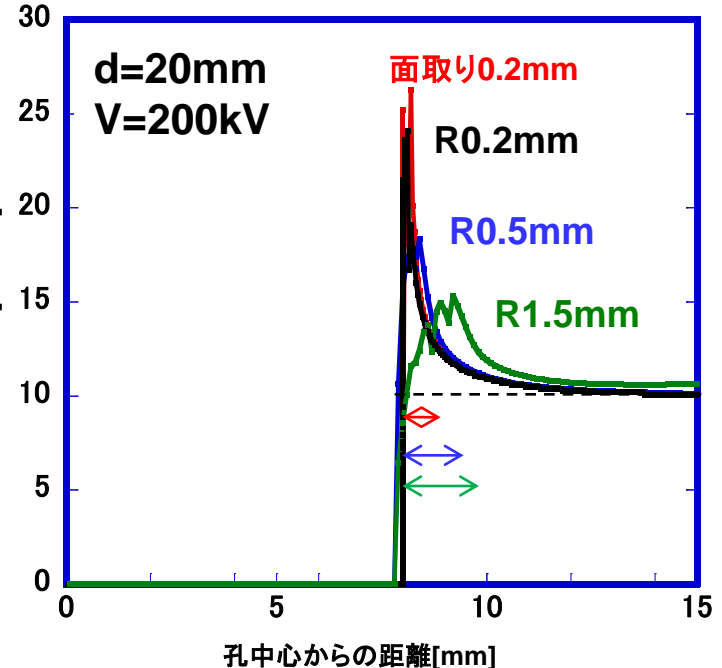
- ・曲率が小さくなるほど最大値は大きくなる
- ・曲率が大きくなるほど平坦な部分より電界が大きいところの距離が長くなる

## 局所電界の最大値

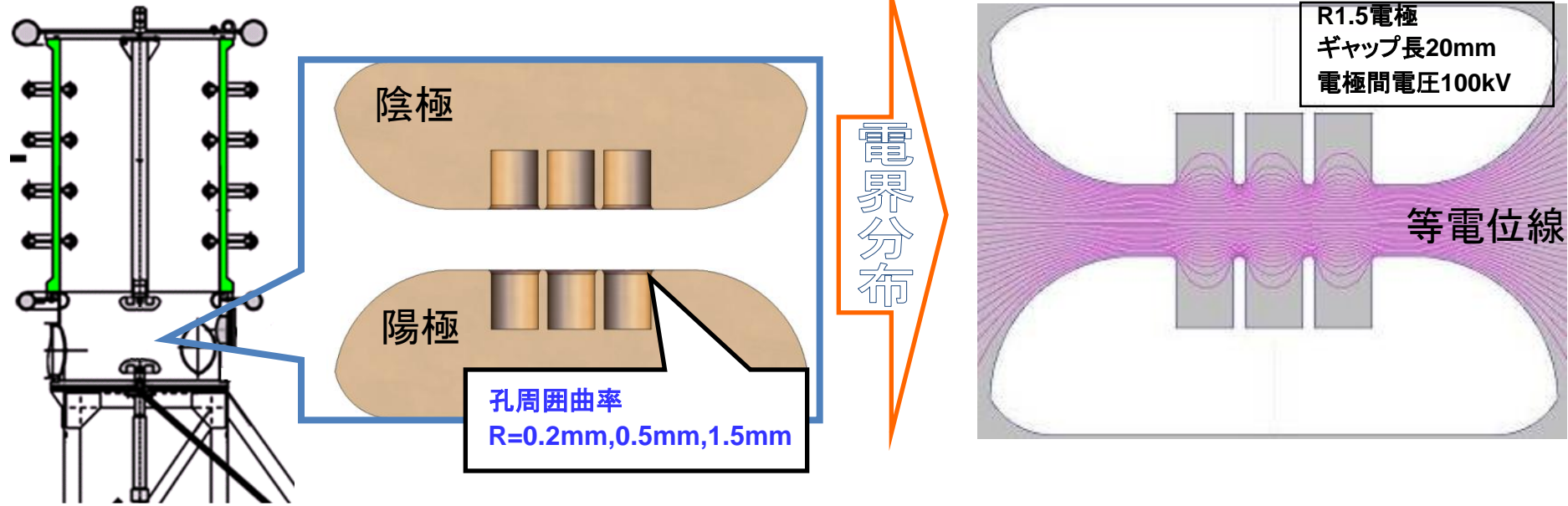
曲率R=0.5mm  
V=200kV



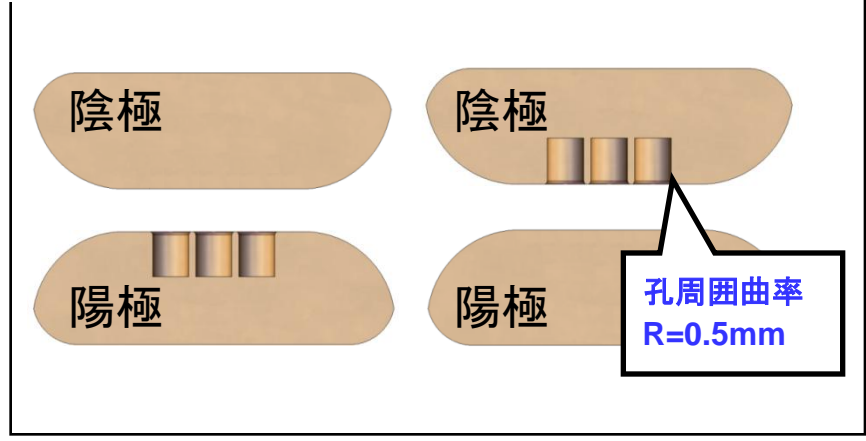
曲率が変わると



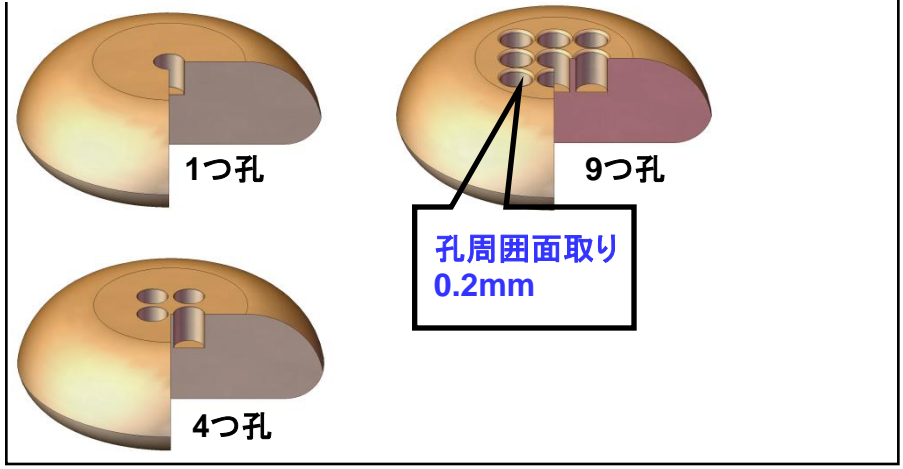
## 局所的な高電界の違いが耐電圧にどのような影響を与えるのか

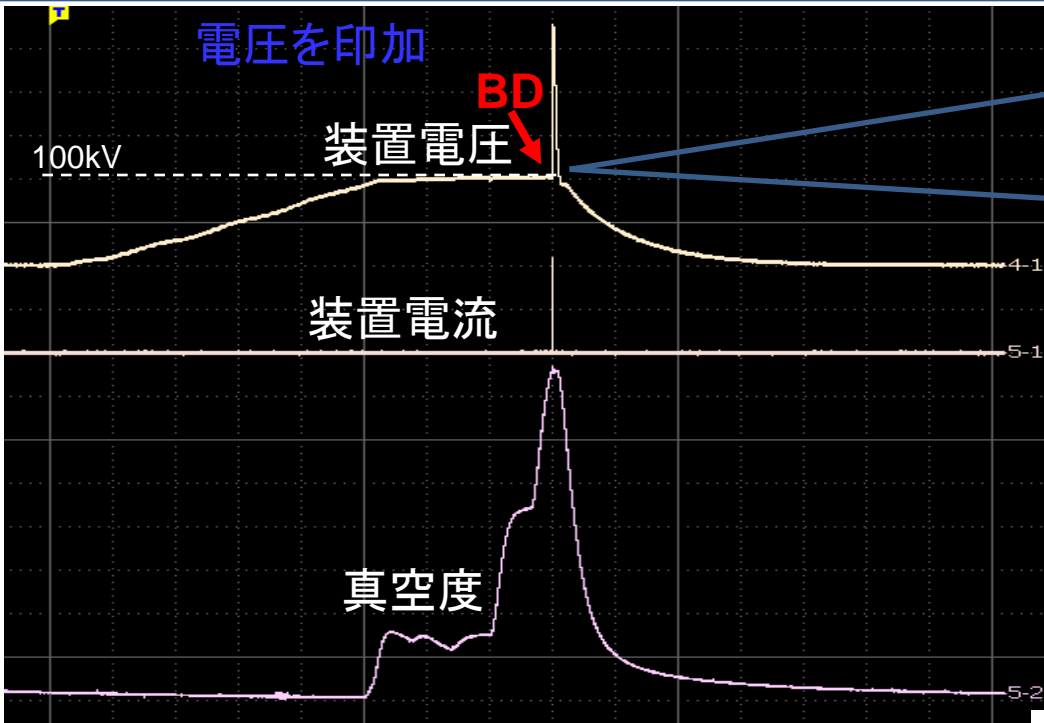


## 陰極と陽極それぞれの局所的な高電界が耐電圧に与える影響



## 局所的な高電界の存在する面積の違いが耐電圧に与える影響



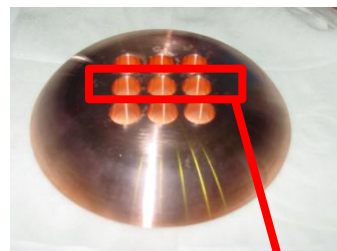


BD時の発光

絶縁破壊電圧が飽和するまでコンディショニング実施

BDを伴うコンディショニングを行いBD電圧が飽和した値を平均化しBD電圧とした。

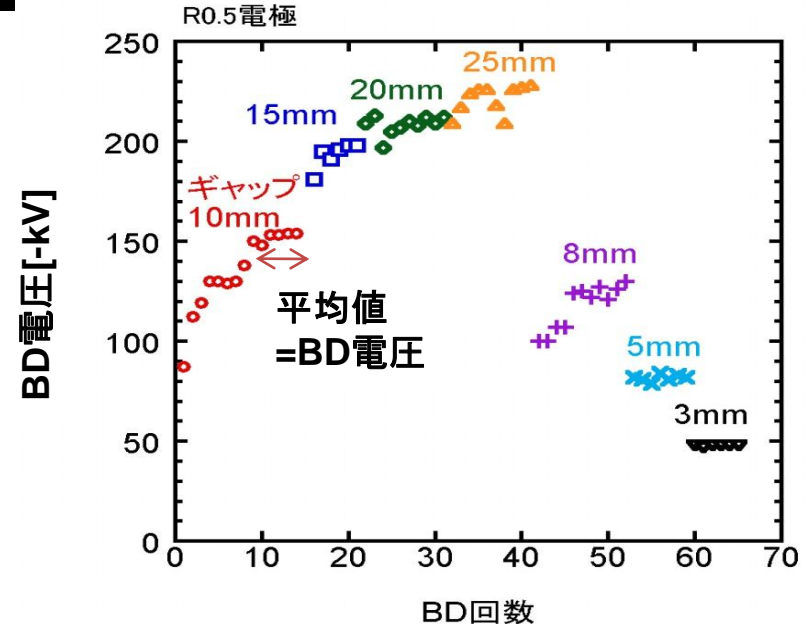
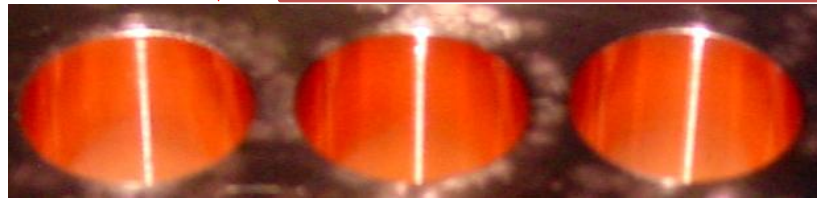
高電圧印加後の観察



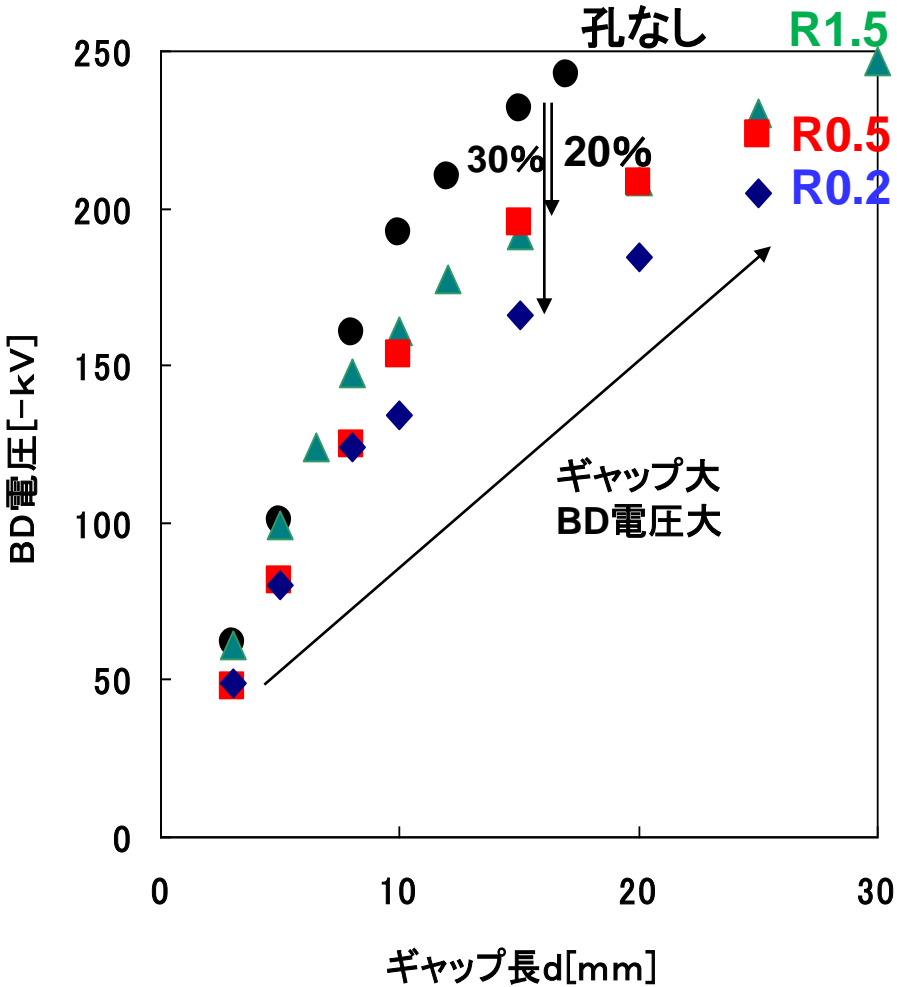
局所的な電界が生じている電極孔近傍において放電痕が観測された

局所電界の最大値に注目

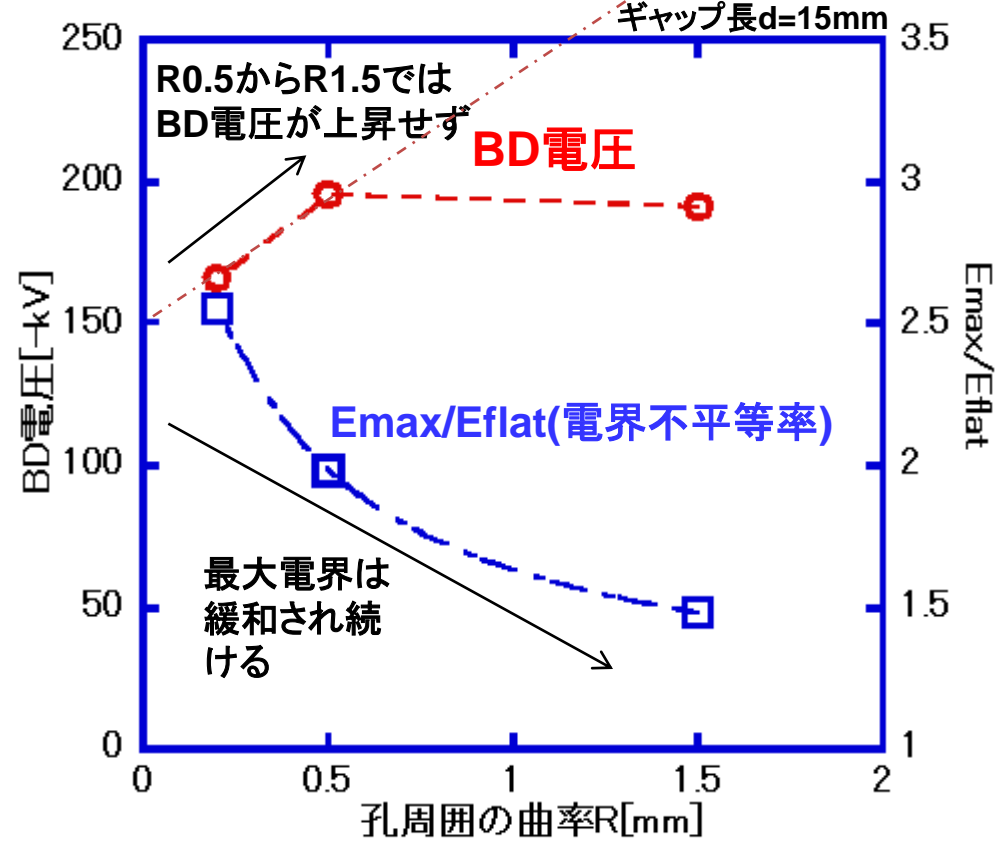
R0.2電極(陽極)



## 各電極のギャップ長依存性



## 曲率半径依存性

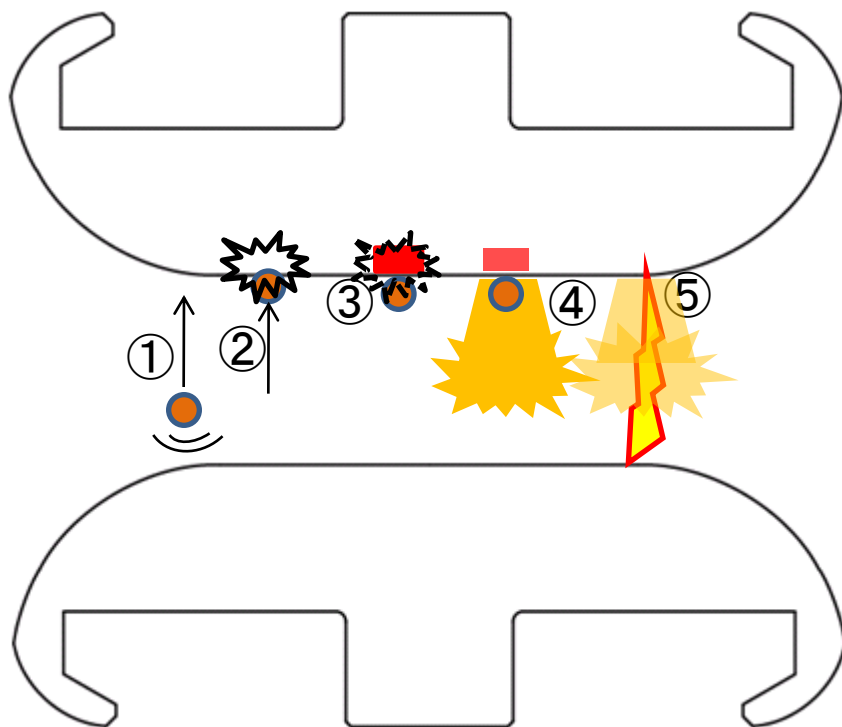


Emax/Eflat=電界不平等率  
=1: 平等電界  
>1: 局所電界が大きい



0.5<R<1.5で耐電圧が飽和→局所電界の最大値による影響を調べる

・クランプエネルギー=K・E・V



クランプとは？

電極表面にゆるく付着している粒子(薄層、塵埃のような巨視的な粒子)のこと

①電極表面のクランプが静電力で脱離

このときのクランプの電荷量 $Q=K \cdot E$

②加速され対向電極に衝突

ギャップ間の電位差 $V$ によりクランプは加速されるので  
クランプのエネルギー=  $Q \cdot V = K \cdot E \cdot V$ となる

③局所的な温度上昇

④蒸気の放出

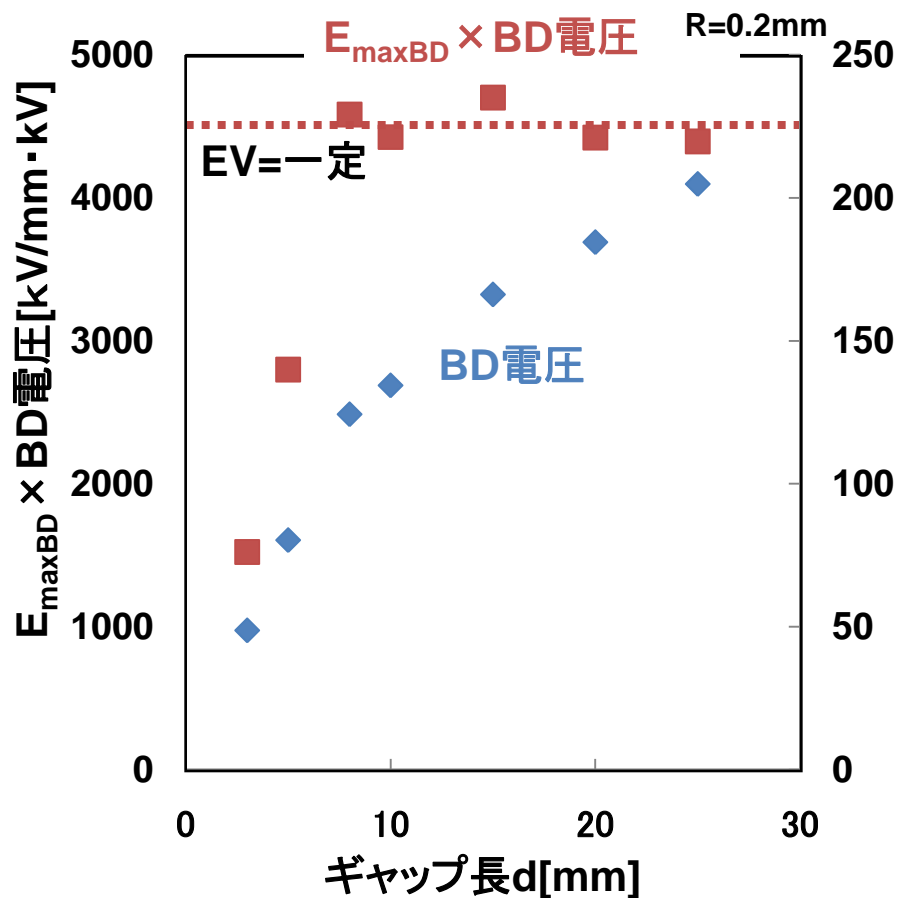
⑤放電へ進展

引用:電気学会技術報告書 第586号p9

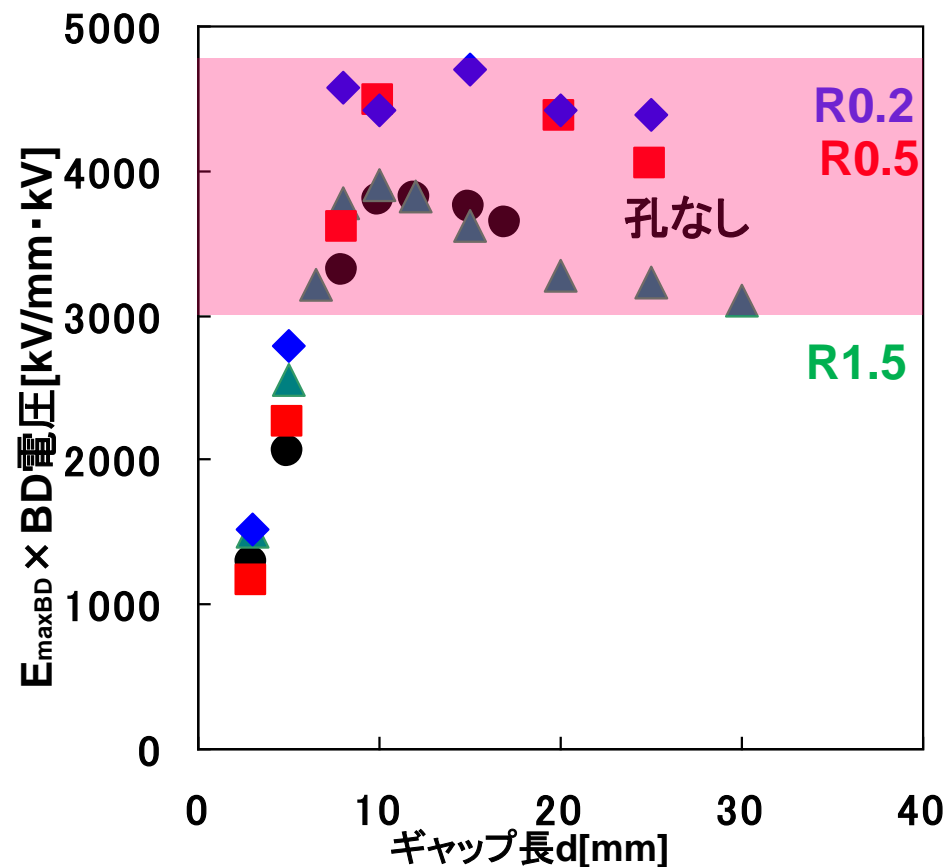
界の最大値である。

0.5 < R < 1.5 で耐電圧が飽和 → 局所電界の最大値による影響を調べる

・クランプエネルギー =  $K \cdot E \cdot V$



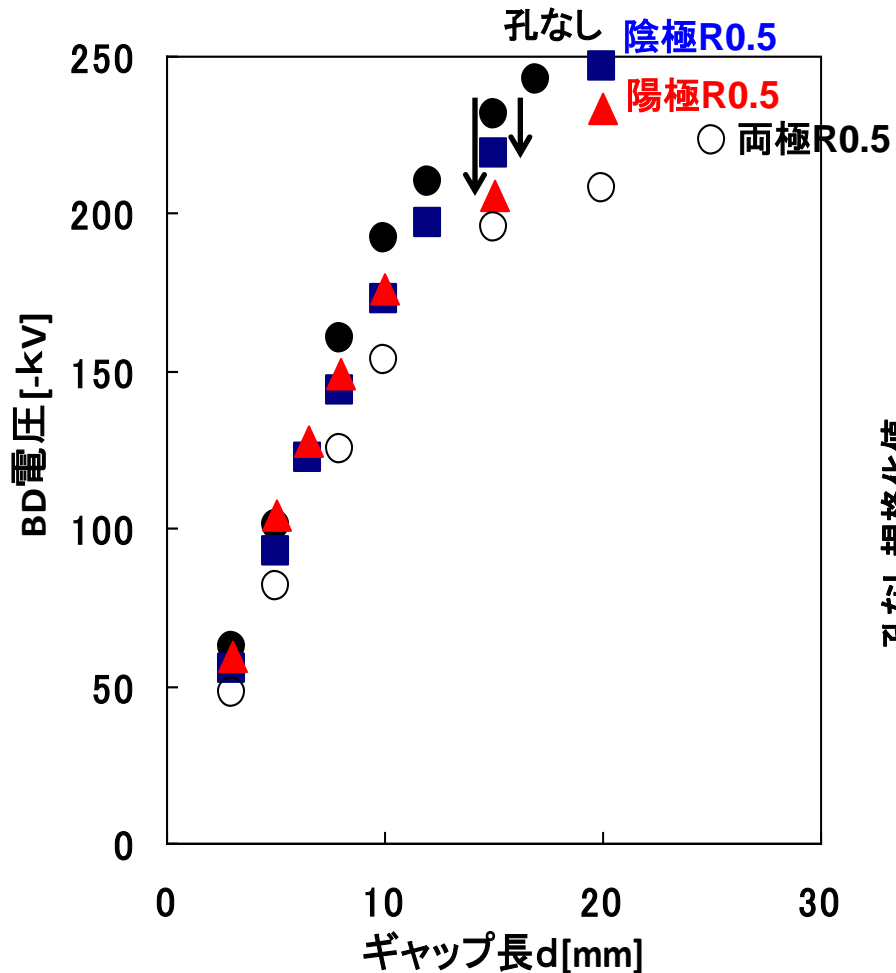
R=0.2 EV vs ギャップ長



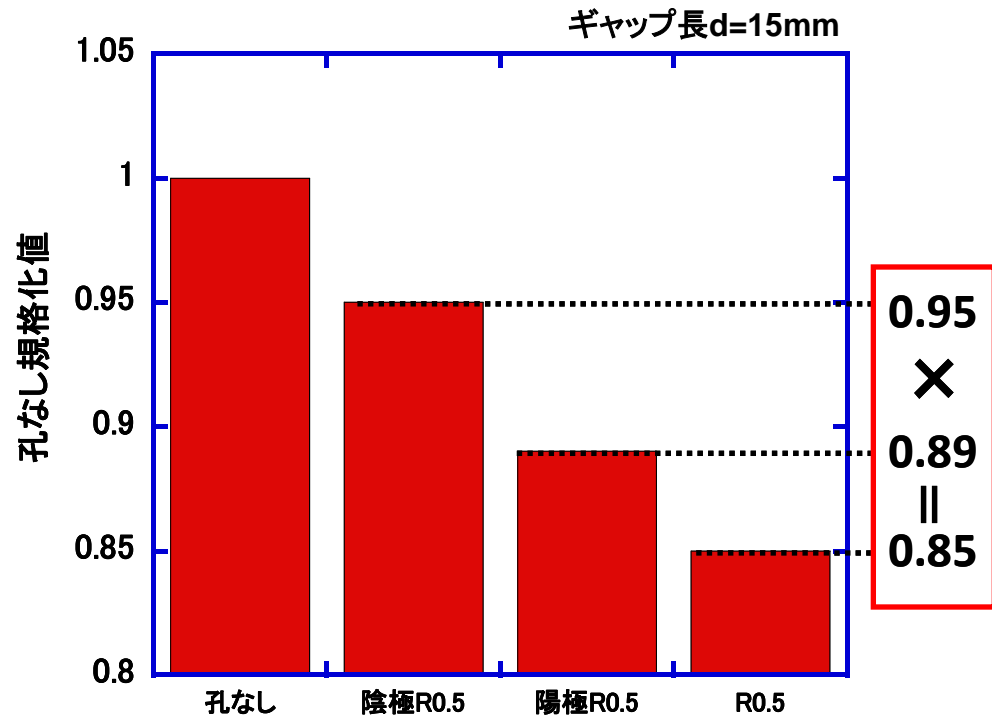
全電極 EV vs ギャップ長

EV=一定から、BD電圧の向上を制限している要素の一つは局所電界の最大値である。

# 片側孔なし電極の絶縁破壊電圧



各電極のギャップ依存性



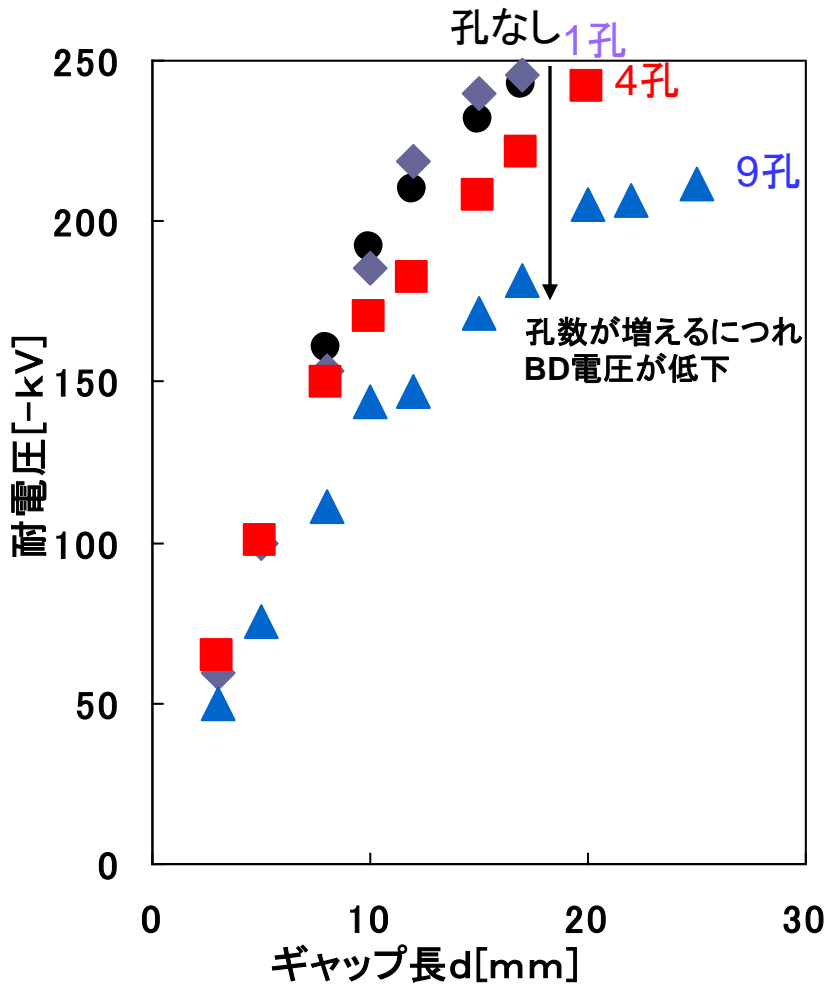
孔なし電極の規格化値

陽極の局所電界の方が陰極の局所電界よりも耐電圧の低下に大きな影響を与えている

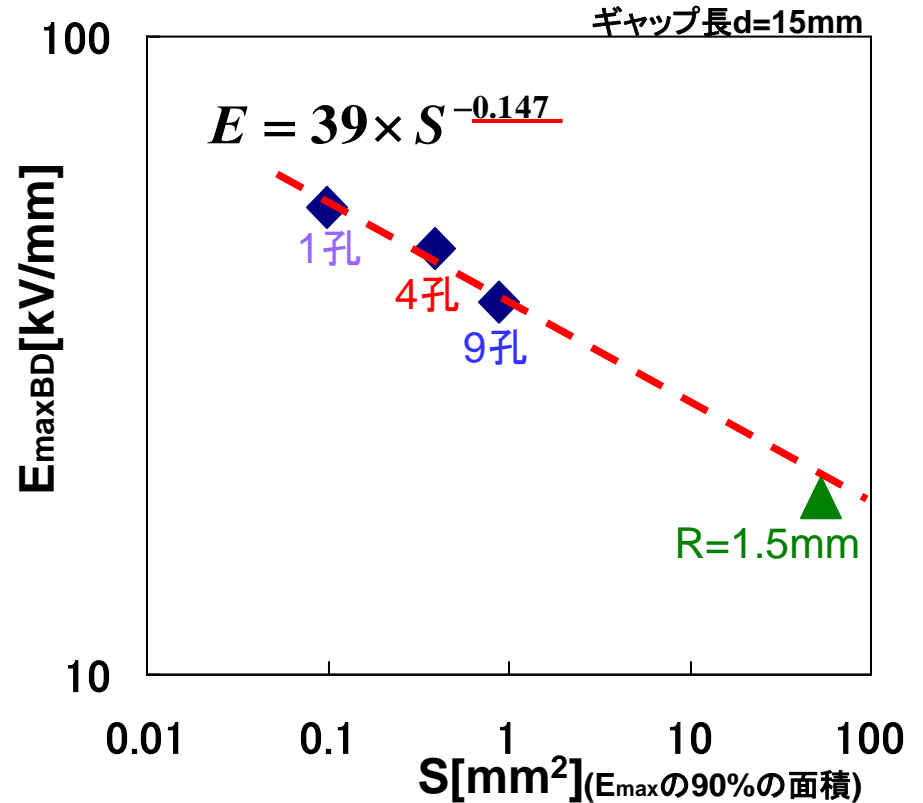
陽極・陰極の各BD電圧の規格値の積から、両極に局所電界が存在しているときのBD電圧を求められる

# 1孔、4孔、9孔電極の絶縁破壊電圧

引用: 電気学会放電ハンドブック出版委員会編  
「放電ハンドブック」上巻、オーム社、p306,(1998)



面積効果:  $V = k \cdot S^{-0.23}$  (平等電界下)  
 $\Rightarrow E = k' \cdot S^{-0.23}$  (平等電界下)



## 各電極のギャップ依存性

## 面積vs局所電界の最大値

不平等電界下では平等電界の面積効果  $V = k \cdot S^{-0.23}$  と一致せず、Sの乗数は大きい値となる

不平等電界下のBD電圧を考えるには単なる面積効果ではなく、局所電界と面積の影響を合わせた新たな考え方が必要である。



## まとめ

孔周囲の曲率半径を変えることにより、局所的に発生する電界を変えた試験電極を用い、孔周辺の局所的な電界と真空耐電圧との関係を調べた。

- 何れの電極においても耐電圧はギャップ長とともに増大する。
- ギャップ長 $d > 10\text{mm}$ の領域では孔がない場合に比べ、孔のある場合の耐電圧は20~30%減少する。
- 孔周囲の曲率半径 $R$ が大きくなるにつれ、耐電圧は向上するが、 $0.5 < R < 1.5$ の領域では耐電圧が向上しない。
- ギャップ長 $d > 10\text{mm}$ の領域において、局所的な電界がある場合でもクランプのエネルギーは一定となる。
- BD電圧の向上を制限している要素の一つは局所電界の最大値である。
- 不平等電界下では平等電界下の面積効果： $V = k \cdot S^{-0.23}$ と一致せず、面積 $S$ の乗数は大きくなる。
- 不平等電界下においてBD電圧を考える際には単なる面積効果ではなく、局所電界と面積の影響を合わせた新たな考え方が必要である。

## 今後の展望

- 化学研磨等により電極表面粗さを変化させた電極を用いて試験を行い、孔周囲の局所電界によるBDの低下量と表面粗さによるBD電圧の低下量を比較し、cm以上のオーダーにおける孔周囲の局所電界緩和が耐電圧向上に優位であるか調べる
- 局所電界が存在する面積と局所電界の影響を考慮して耐電圧低下の原因を調べる。