

# RESEARCH AND DEVELOPMENT ON SURFACE FLASHOVER VOLTAGE OF CERAMICS

Shuji Mihara <sup>#,A)</sup>, Masakazu Yoshioka <sup>B)</sup>, Hiroshi Matsumoto <sup>B)</sup>, Toshikazu Kurihara <sup>B)</sup>, Toshiyuki Ohba <sup>C)</sup>, Takeshi Maeda <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Kyocera Corporation

10-1 Kawai-cho, Higashiomi, Shiga, 529-1595

<sup>B)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup> Nippon Advanced Technology Co, Ltd

3129-45 Muramatsu-hibara, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1112

## Abstract

Alumina ceramics is one of the most important materials for a high voltage insulator to apply the vacuum seal. However, a flashover voltage along the surface is lower than that of an inside of bulk material with the same length. Despite extensive research that has been carried out to improve surface flashover voltage in the vacuum, the surface flashover mechanism is not clarified yet. In this paper, we report the studies of flashover on various types of alumina ceramics in an ultra-high vacuum atmosphere. We found that surface flashover voltage was drastically improved by adding a small amount of the conductive substance for alumina ceramics and a surface flashover occurred in an extremely short time.

## 高沿面耐電圧セラミックスの開発研究

### 1. はじめに

アルミナ質セラミックスは、金属との接合が容易で比較的安価であるだけでなく、機械的強度が高く低誘電損失でありベーキングも可能であることから、高電圧絶縁部材や高周波窓として広く使用されている。セラミックスの耐電圧は沿面耐電圧で制限される。通常のセラミックスの沿面放電電圧は同一距離での材料バルク放電電圧よりも低いためである。多くの沿面耐電圧を高める試みがなされているが、真空中での沿面放電メカニズムが未解明であるため材料の抜本的な向上が難しいのが現状である<sup>[1]</sup>。そこで筆者らは、試験環境を超高真空にすることにより微小な真空変化を検出可能とし、同時に時間分解能を向上した高電界試験装置を構築した。これにより沿面放電の素過程を観測して物理現象を理解し、材料改善に資することを目指して開発研究を行っている。

本研究では、アルミナに導電性物質を添加することで沿面放電電界強度を高めるだけでなく、放電回数を激減することが可能であることを見出した。また、沿面放電現象はナノ秒オーダーの極めて短時間で発生することが判明した。

### 2. 実験方法および装置の特徴

#### 2.1 実験装置

図 1 に本実験で用いた直流高電界試験装置、図 2 に放電現象測定回路を示す。この装置と回路は直流

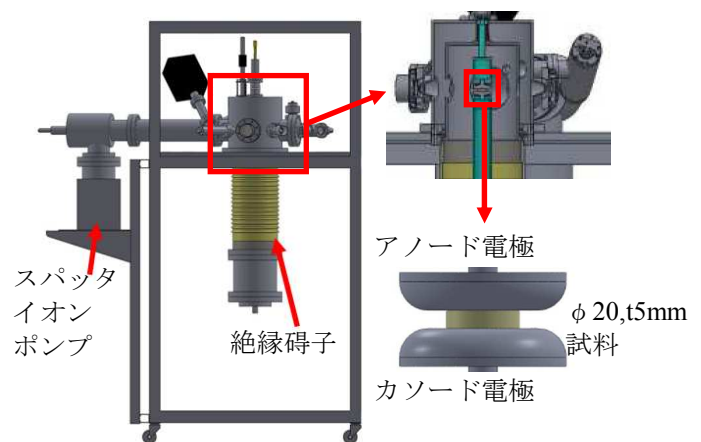


図 1 直流高電界試験装置

高電界下において、セラミックスの沿面放電電流を測定し、放電の素過程を観測することを目的として作製したものである。また、放電時の物理現象を正確に捉えるため、放電にともなう微小な真空変化を観測できるような超高真空装置である。試験セラミックス(Φ20、t5mm)はカソードとアノード電極対間に挿入する。カソードにマイナスの高電圧を印加し、アノードはグラウンドに接続する。アノードは真空チャンバーと絶縁し、沿面放電電流はカソードから試料沿面を通じてアノードへ流れる。電流波形はアノードとグラウンド間に接続した 1kΩ 抵抗の両端電圧をオシロスコープで測定する。この時の時間分解能はナノ秒オーダーである。

装置の超高真空を得るため、ベーキングによる粗排気とイオンポンプによる主排気を行い、容器内圧

力は  $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{Pa}$  を実現している。

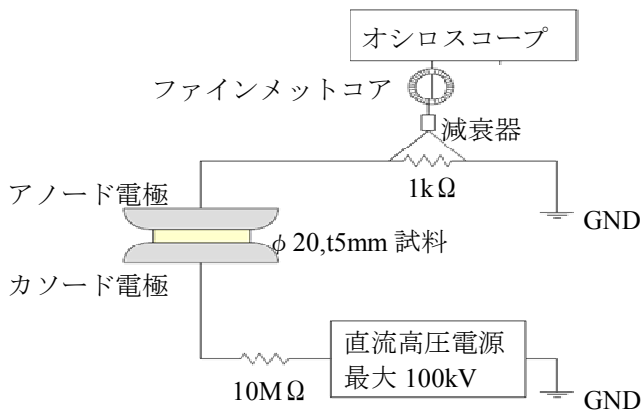


図2 放電現象測定回路

## 2.2 試料

本実験では3種類のアルミナ質セラミックスを用いた。各試料の物性値を表1に示す。

材料	単位	① 一般材	② 開発材	③ 高導電性材
アルミナ純度	%	99.7	金属ドーブ	金属ドーブ
体積固有抵抗率	$\Omega \cdot \text{cm}$	$10^{14}$	$10^{13}$	$10^{13}$
表面抵抗率	$\Omega/\text{sq}$	$10^{13}$	$10^{13}$	$10^5$
嵩密度	$\text{g}/\text{cm}^3$	3.96	3.85	3.85
比誘電率	-	9.9	12	12
誘電正接	-	$1 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-4}$	-

表1 各アルミナ試料の物性値

- ① 純度 99.7%の一般的なアルミナ材料で、以後『一般材』と呼ぶ。
- ② アルミナに金属酸化物を添加することで体積固有抵抗  $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$  と試料全体に若干の導電性を持たせた材料で、以後『開発材』と呼ぶ。
- ③ ②の開発材を表面特殊処理することで表面近傍のみ導電性を更に高め、表面抵抗率を  $10^5 \Omega/\text{sq}$  としながらも体積固有抵抗は  $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$  と試料全体の絶縁性は維持した材料で (図3参照)、以後『高導電性材』と呼ぶ。

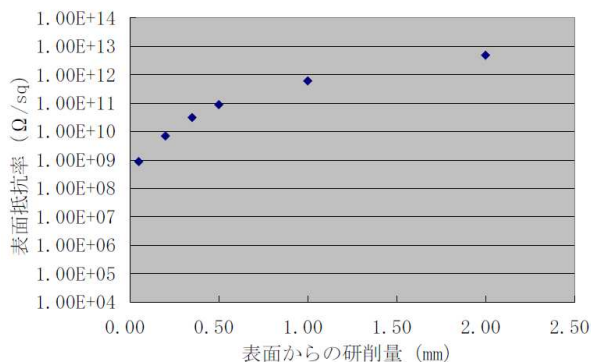


図3 ③高導電性材の表面からの研削量と表面抵抗率

## 2.3 実験方法

試料と電極はアセトン中で超音波洗浄装置によって十分に洗浄した。超高真空環境作製後の沿面耐電圧試験方法を図4に示す。

- A) 初回の沿面耐電圧試験を run number1 とし、電界強度  $0 \text{MV}/\text{m}$  から試験を始める。
- B) 放電するまで電界強度を上昇する。
- C) 放電した場合、これを初期放電電界強度と定義する。
- D) 放電後に電界強度を  $0 \text{MV}/\text{m}$  へ戻し、次の run number へ移行する。
- E) run number2 では再び電界強度  $0 \text{MV}/\text{m}$  から放電が発生するまで電界強度を上昇する。
- F) 放電すると  $0 \text{MV}/\text{m}$  に戻す。
- G) これを複数回繰り返した後、放電後も電界強度上昇を継続することもある。この場合は電界強度毎の放電回数を記録する。

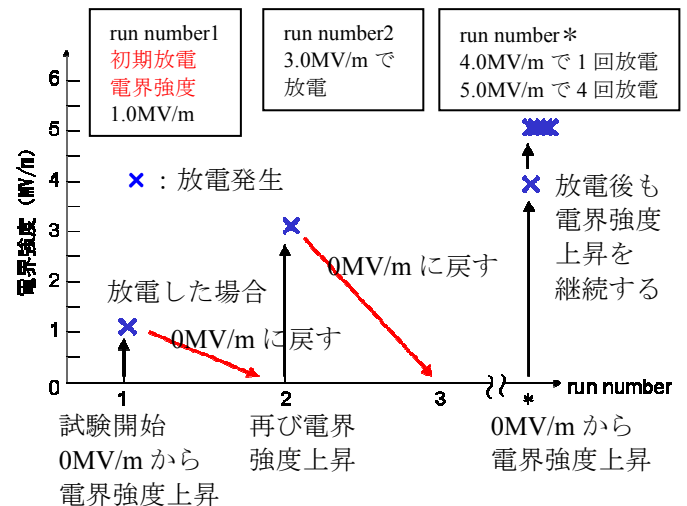


図4 沿面耐電圧試験方法概略図

以上の方法で測定を行い、②開発材の測定結果を元に run number、電界強度、放電回数について3軸のグラフを作成すると図5のとおり run number 毎の放電電界強度の推移を読み取ることができる。

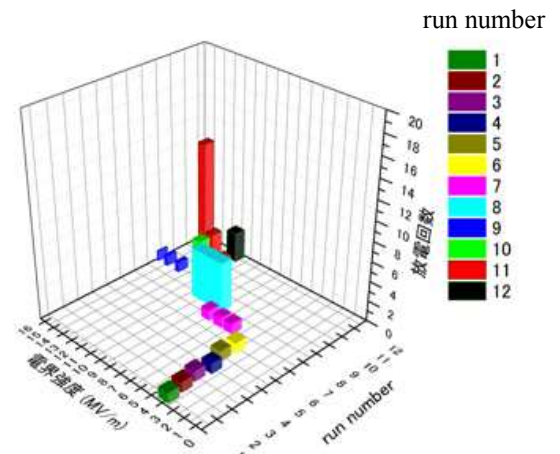


図5 ②開発材の沿面耐電圧試験結果

### 3. 実験結果

#### 3.1 初期放電電界強度と放電回数測定結果

①一般材と②開発材の沿面耐電圧試験結果を図 6 に、電界強度範囲 0~5MV/m を抜粋拡大したものを図 7 示す。図 6 に示すように①一般材の放電回数が明らかに多い結果となった。また、放電開始電界強度にも違いが見られ、①一般材は 2.2MV/m に対し②開発材は 3.8MV/m と高い値となった。これは金属酸化物の添加によって試料全体に微弱な導電性を持たせた結果、沿面での電子の移動が容易になり、チャージアップ発生を抑制した結果と推測できる。この点については引き続き研究を行っている。

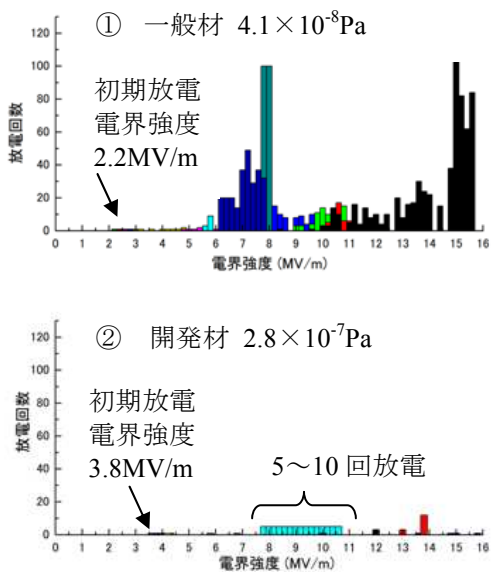


図 6 ①一般材と②開発材の沿面耐電圧試験結果

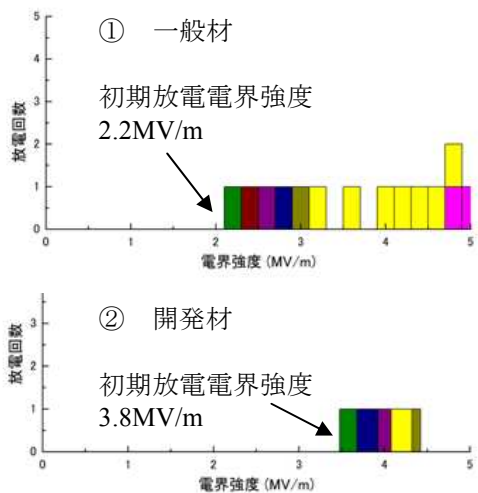


図 7 試験結果抜粋拡大 (0~5MV/m)

#### 3.2 放電電流値測定結果

①一般材と②開発材の放電電流値の測定結果例をそれぞれ図 8、図 9 に示す。

図 8 は①一般材が 6.8MV/m で放電した際のオシ

ロスコープの電流波形である。その半値幅は、20.8 ナノ秒と極めて短時間の現象であることが判る。この事象においては 3 段階の放電が起こっていることが判る。このように複数のピークが現れる原因については、今後も研究を継続する。

図 9 は②開発材が 14.0MV/m で放電した際のオシロスコープの電流波形である。その半値幅は 15.2 ナノ秒と同じく極めて短時間での放電現象であった。

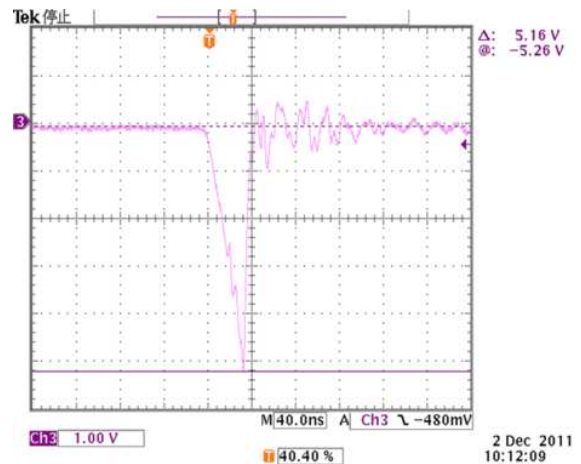


図 8 ①一般材の放電時の電流波形

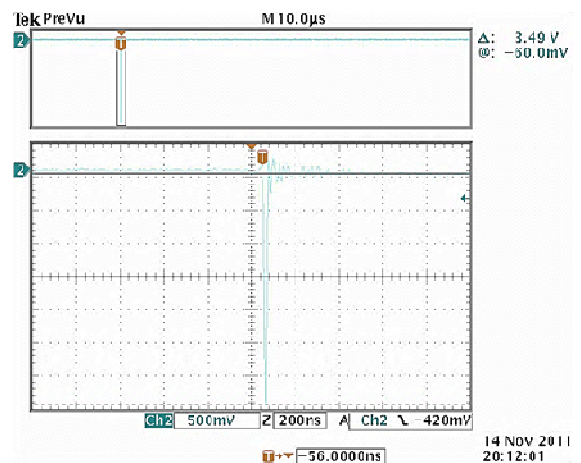


図 9 ②開発材の放電時の電流波形

表 2 に測定した放電電流値を材料毎にまとめた。②開発材の放電電流値は①一般材と比較して最小値、最大値、平均値のいずれも小さい。これは②開発材のチャージアップ抑制効果と考えられる。

	放電電流値 (A)		
	最小値	最大値	平均値
①一般材	2.8	4.9	3.7
②開発材	0.1	2.8	1.1

表 2 各試料の放電電流値

### 3.3 放電痕の観察結果

実験後の試料について放電痕の観察を行った。図 10 は①一般材、図 11 は②開発材の観察結果を示す。

図 10 では明確に雷状の放電痕が観察され、拡大すると試料沿面全体に溶解した痕跡のある組織となっていた。図 11 でも同様に雷状の放電痕と試料沿面に溶解した痕跡が見られたが、①一般材に比べ溶解した面積が少ないのは、放電回数が少ないためと思われる。

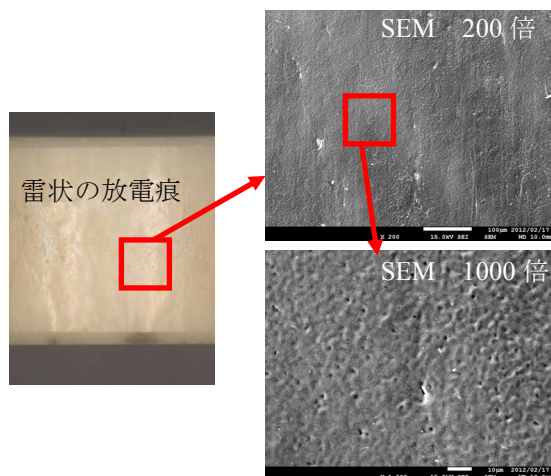


図 10 ①一般材の観察結果

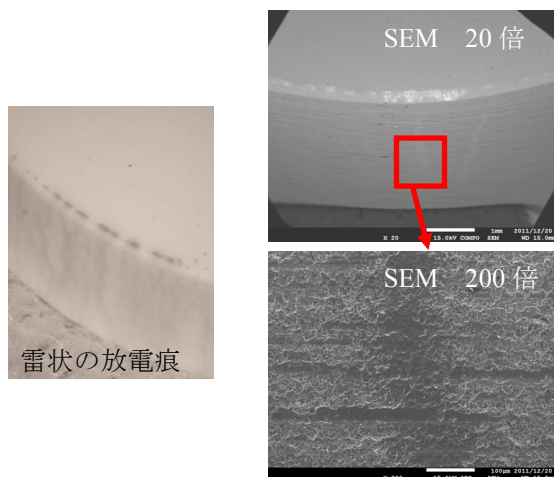


図 11 ②開発材の観察結果

### 3.4 ③高導電性材の高電界試験結果

ここまで表 1 に示した 3 種類のアルミナ試料のうち、①一般材と②開発材の 2 種類の材料の高電界試験結果を報告した。残る③高導電性材については、沿面放電が発生しなかったため、以下に試験結果を述べる。

③高導電性材では図 12 のとおり試料に印加する電界強度上昇に比例して、試料を通じてアノードからグラウンドへ流れる電流値が上昇した。この間、②開発材の初期放電電界強度である 3.8MV/m を大き

く超え、高圧電源の最大電流制限となる 12MV/m を印加しても放電が発生しなかった。

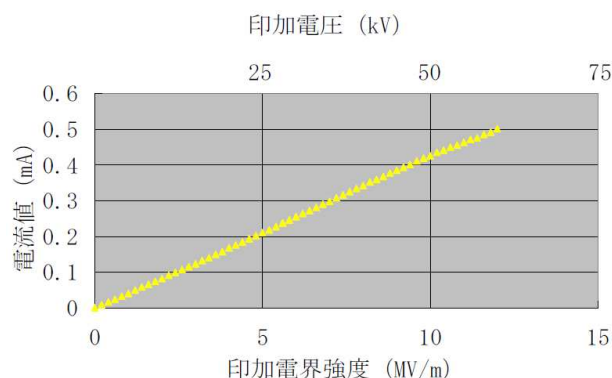


図 12 ③高導電性材の高電界試験結果

この③高導電性材では、製造プロセスにおける表面特殊処理の結果、材料の深さ方向の空孔分布頻度に傾斜を持たせることができた。表面近傍では特に空孔が多く、電子の移動が表面特殊処理前の②開発材に比べ更に容易になったことによって、チャージアップ発生を完全に防ぎ、放電を防止したと考えられる。③高導電性材の表面抵抗率と表面特殊処理後の表面からの研削量の関係は図 3 に示したとおりである。研削量を変えることで任意の表面抵抗率とすることができるため、アプリケーションに応じて使い分けることが可能である。

## 4. まとめ

超高真空下で微小な真空変化を観測できる高電界試験装置と、時間分解能を向上した測定装置を開発することにより、沿面放電の素過程を観測することで、以下の事を明らかにした。

- ・ アルミナに導電性物質を添加することで、沿面放電電界強度を高め、放電回数を激減させることができた。この改善の詳細なメカニズムについては更なる研究が必要である。
- ・ 真空中の沿面放電現象はナノ秒オーダーの短時間現象であることが判明した。
- ・ 材料中の導電性に傾斜を持たせ、表面近傍のみ更に導電性を高めることで、高電界印加時のチャージアップを完全に防止でき、放電発生そのものを防ぐことができた。この場合、材料に通電が発生するため、アプリケーションに応じた使い分けが必要となる。

## 参考文献

- [1] R.V. Latham, "High Voltage Vacuum Insulation", Academic Press.