

粉体用サイロ内で発生する 静電気現象の解析および対策例

労働安全衛生総合研究所 庄山 瑞季

粉体を取扱う産業現場

貯蔵設備で発生する静電気現象

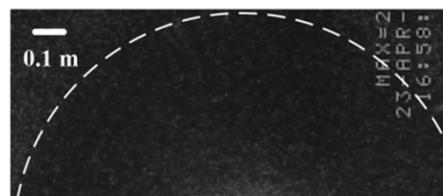
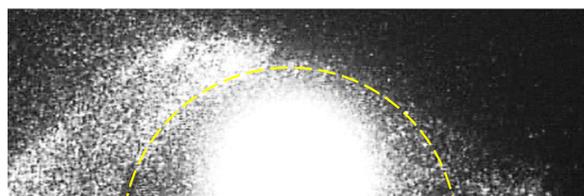
→ 火災や粉じん爆発などの重大な事故を引き起こす原因

配管・フレコンと接触・摩擦を繰り返して粉体が帯電

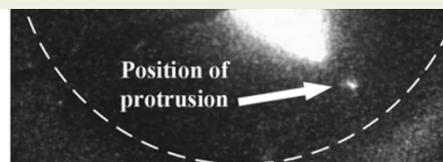
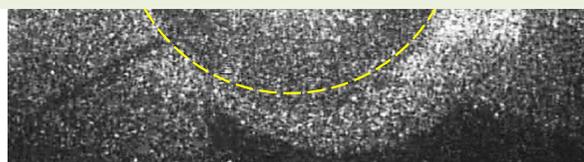
→ 貯蔵庫内に帯電粒子を投入 → 電荷が蓄積

→ **静電気放電発生**（金属突起物：放電が頻発）

→ 可燃性物質に着火する危険性



特に絶縁性粉体を利用する場合の対策は難しい



粉体用サイロの一般的な静電気対策

接地・ボンディング

不活性ガスの利用

加湿

充填速度の調整

帯電防止剤

除電器の利用

本日の内容

粉体の充填速度

粉体の抵抗率

接地金属棒

配管用除電キャップ

本日の内容

粉体の充填速度

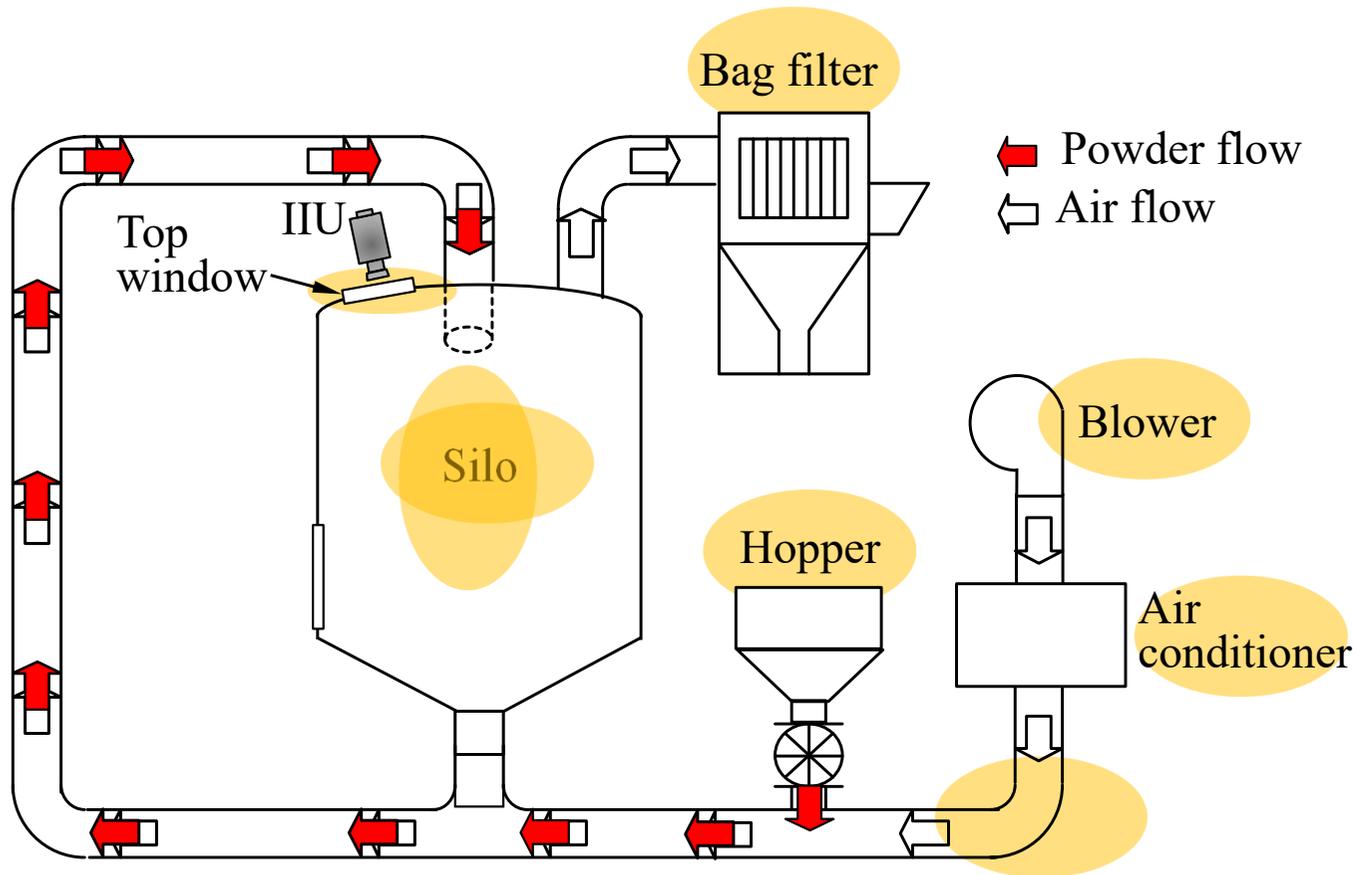
粉体の抵抗率

接地金属棒

配管用除電キャップ

実験装置および方法

サイロシステム



ホッパー

ステンレス製

容量：0.1 m³

配管

ステンレス製

直径：0.1 m

全長：約23 m

サイロ

ステンレス製

直径：1.5 m

高さ：3.8 m

容量：4.8 m³

空気流量：11.5 m³/min

粉体流量：0.1-0.68 kg/s

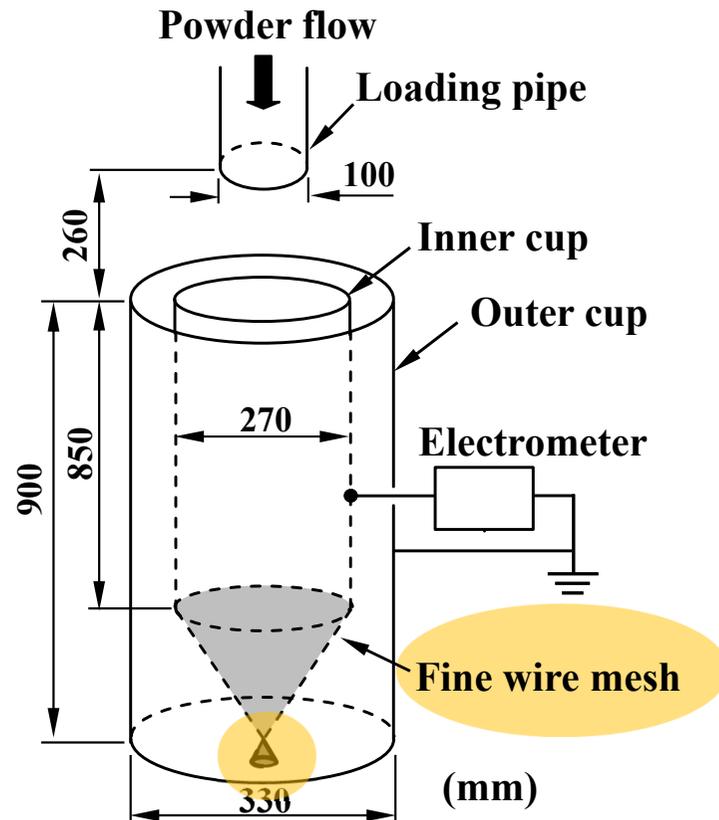
内部温度 30 ± 5 °C

内部湿度 30 ± 7 %

投入粉体の比電荷測定

ファラデーカップ

サイロ投入直後の粉体の比電荷を測定



設置場所：サイロ内

配管端の26 cm下

捕集量：約1 kg

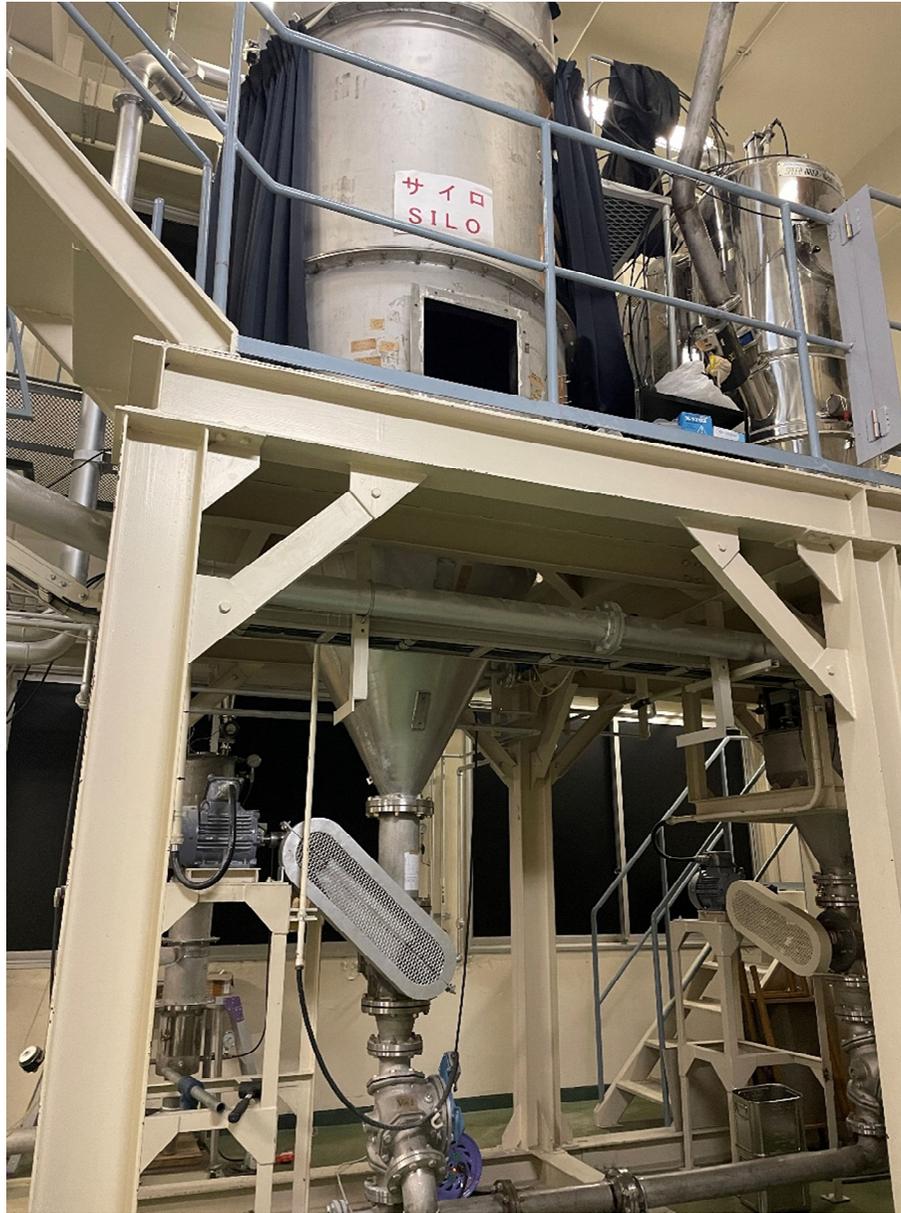
配管から排出された粉体を捕集

→ 帯電量を測定

→ 金属メッシュ下部から粉体を

排出させ、重量を測定

実際の写真

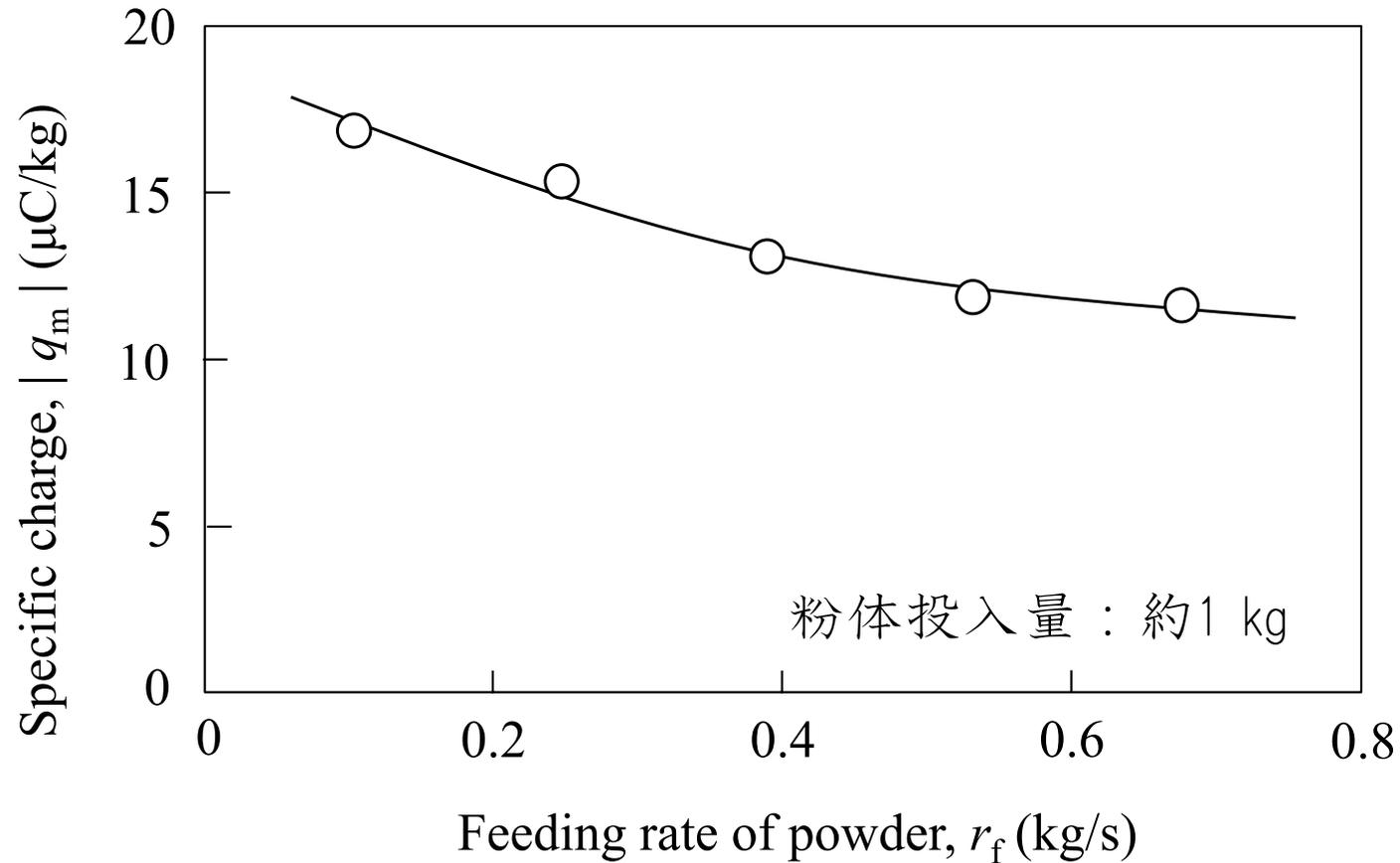


約3mm のポリプロピレン粉体



M. Shoyama, et al., Effect of powder feeding rate on electric charging and discharging in powder loading. *Powder Technology*, 424, 118538 (2023)

粉体の充填速度が比電荷に及ぼす影響



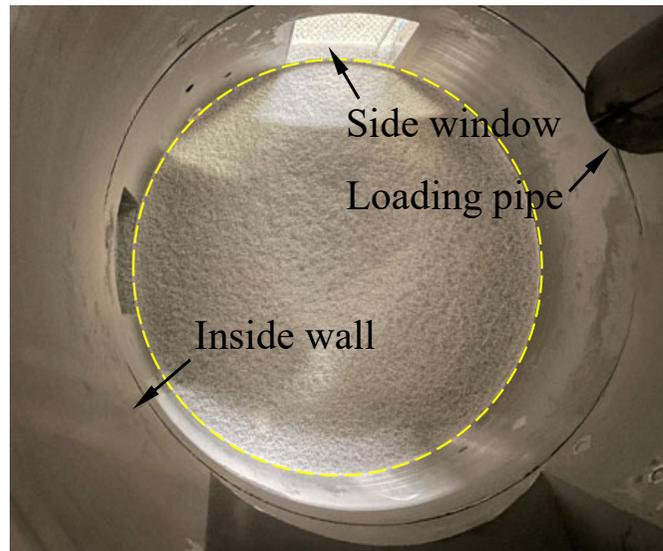
粉体の充填速度増加に伴い比電荷は減少
(配管内壁との衝突回数が減少したため)

サイロ内への粉体連続投入と放電観察

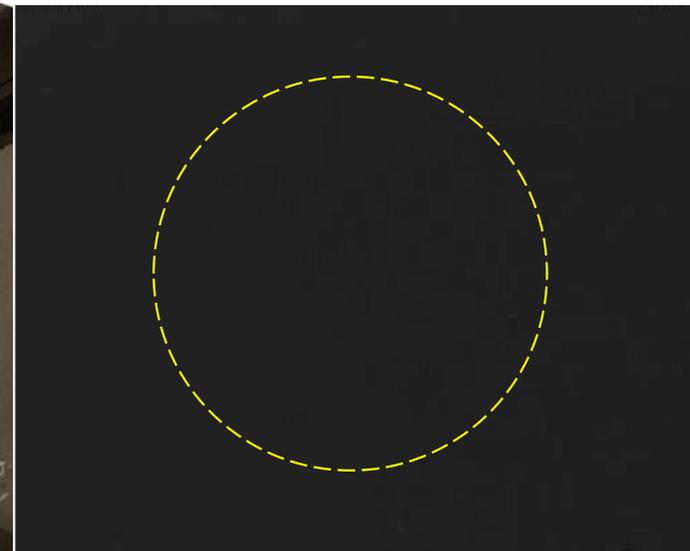
粉体投入量 : 800 kg

粉体流量 : 0.1-0.68 kg/s

0.5 m

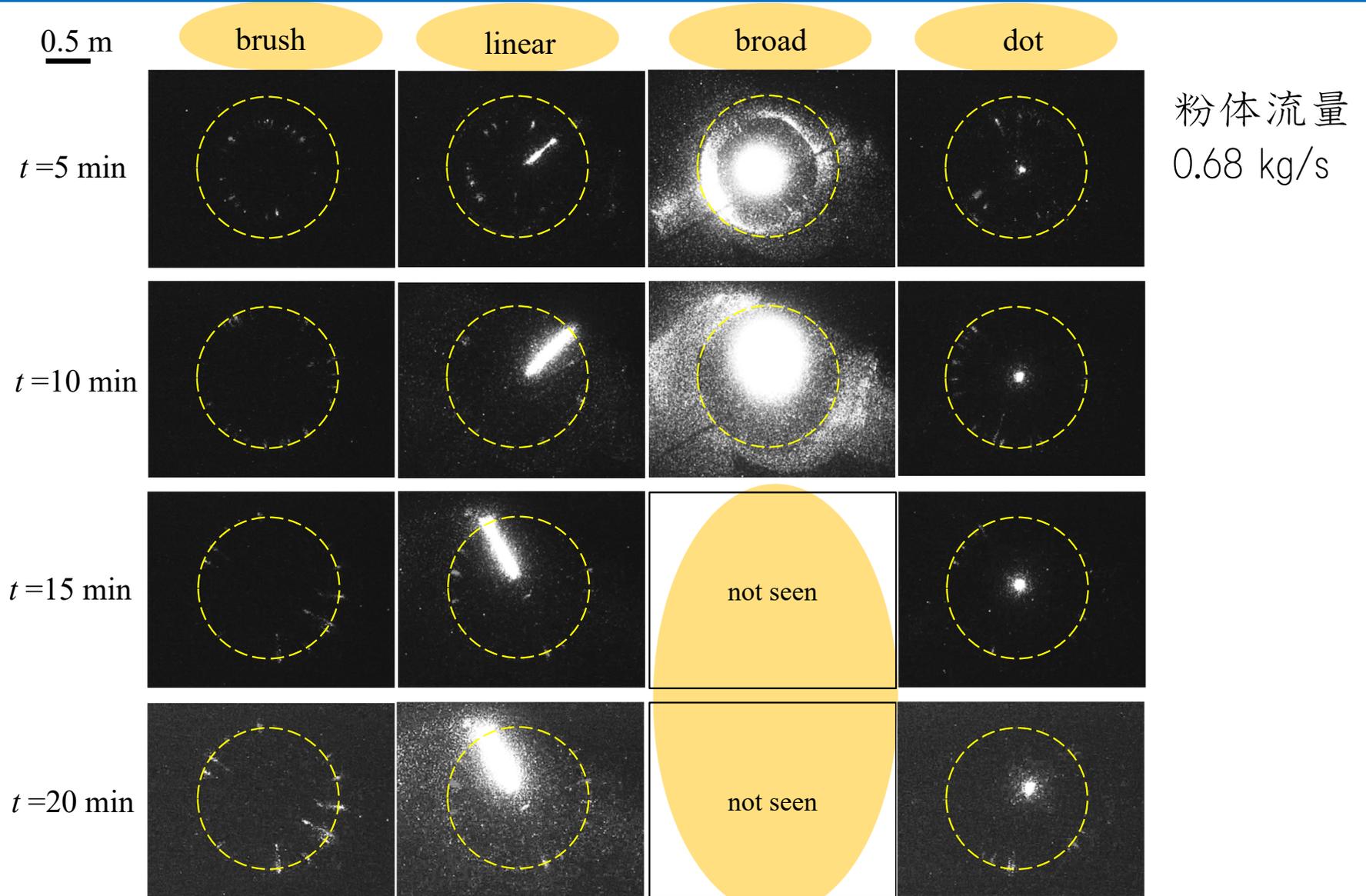


Top view of inside silo



IIU gain 4.5

放電の種類と強度

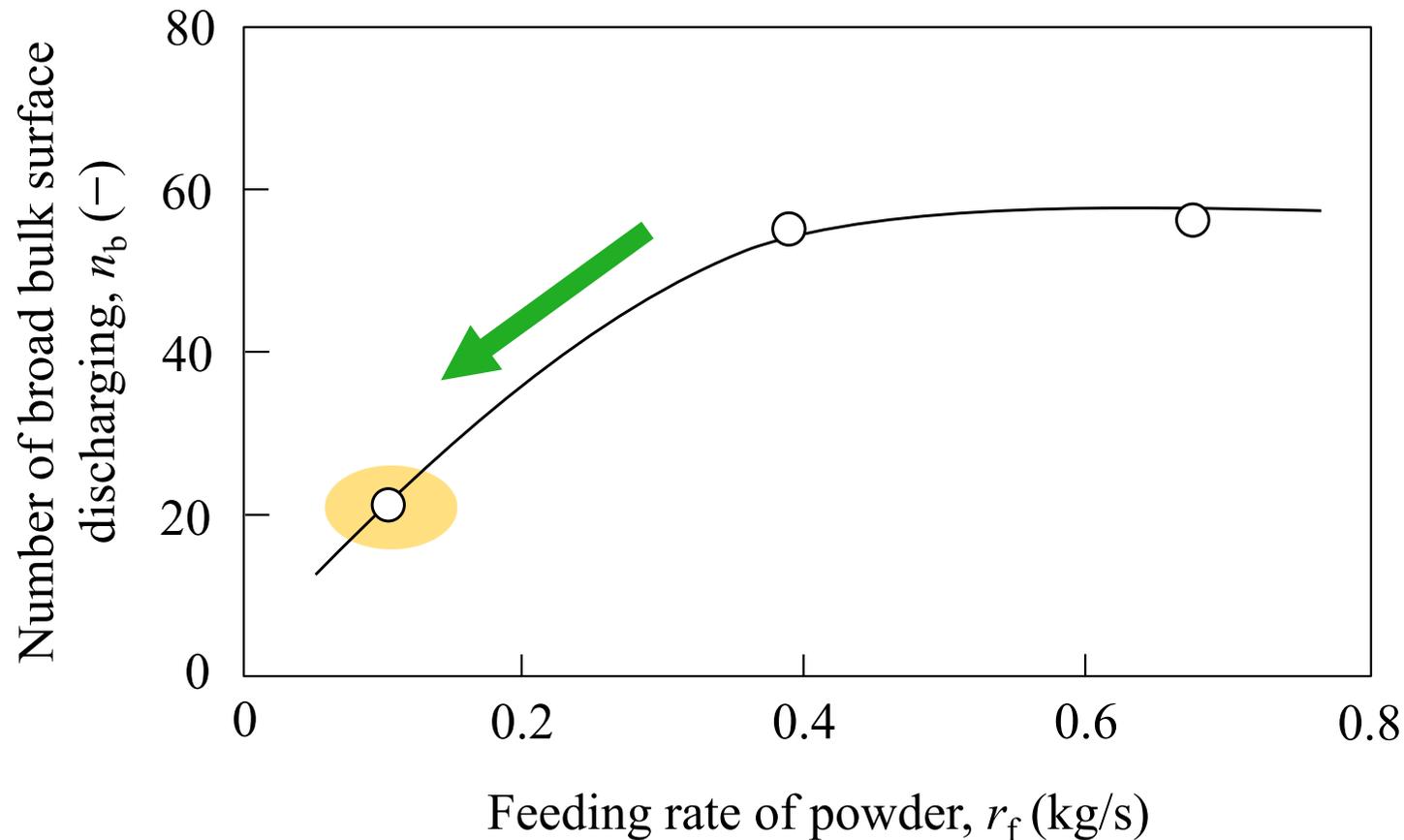


放電は主に4種類 充填高さ増加 → 放電強度増加

M. Shoyama, et al., Effect of powder feeding rate on electric charging and discharging in powder loading. *Powder Technology*, 424, 118538 (2023)

粉体の充填速度が放電発生回数に及ぼす影響

粉体流量 : 0.68 kg/s



充填速度小 → 放電抑制（比電荷大だが全体の電荷量は小）
充填速度0.1 kg/sでも面状バルク表面放電は20回以上発生

粉体の充填速度を小さくすることで電荷蓄積は抑制される

粉体の抵抗率が大きい場合、コーン放電の発生をゼロにできない可能性

本日の内容

粉体の充填速度

粉体の抵抗率

接地金属棒

配管用除電キャップ

未発表の内容を含むため
割愛させていただきます。

本日の内容

粉体の充填速度

粉体の抵抗率

接地金属棒

配管用除電キャップ

除電器

コロナ放電を利用した除電器

正負イオンによって電氣的に中和（除電）

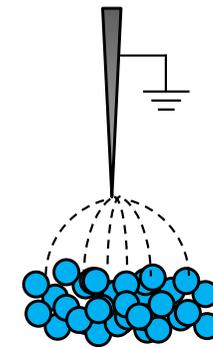
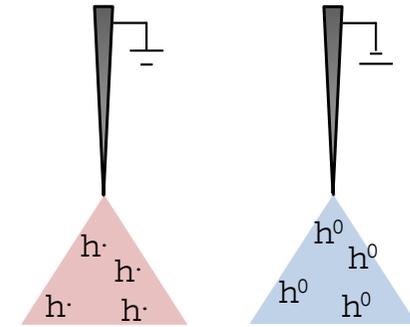
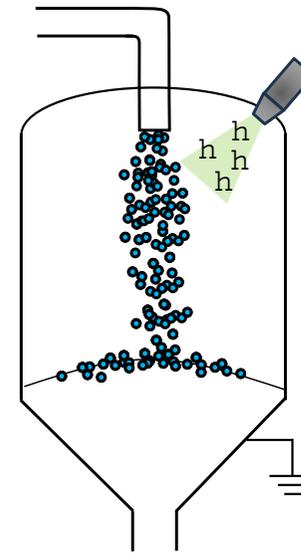
電圧印加式

- 高電圧電源を利用
- 防爆仕様

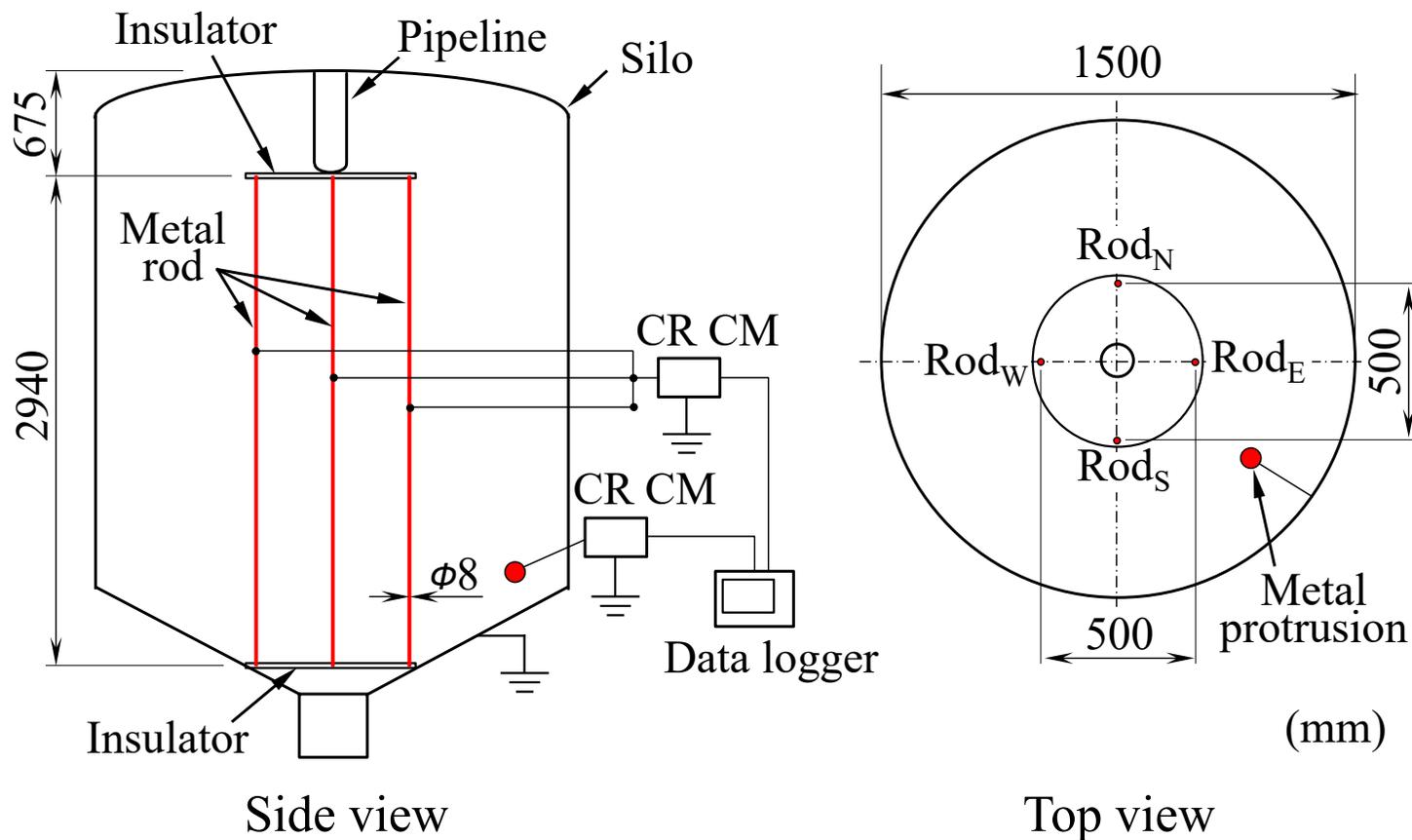
設置場所が限定 高コスト

自己放電式

- 電源を利用しない
- 接地電極のみの簡易な構成
- 帯電粉体と電極の間に形成される電場を利用
- どこにでも簡単に取付け可能



接地金属棒の取付け

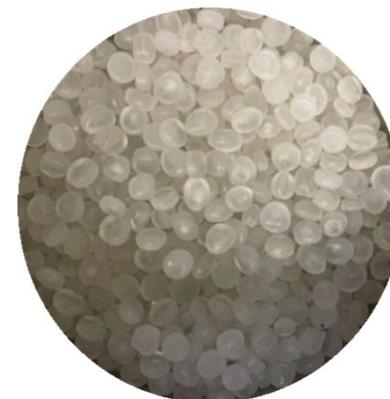
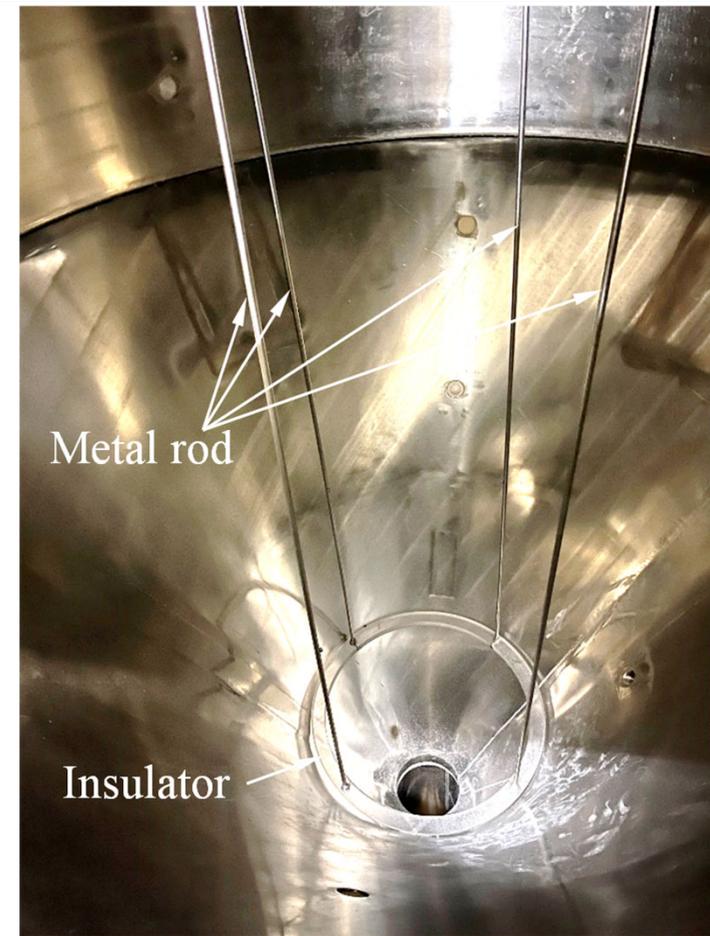


直径：8 mm， 長さ：約3 m

1～4本の金属棒と金属球のいずれかまたは両方を取付け
各金属棒と金属球をクーロンメータおよびデータロガーに接続

検出される放電電荷量を測定

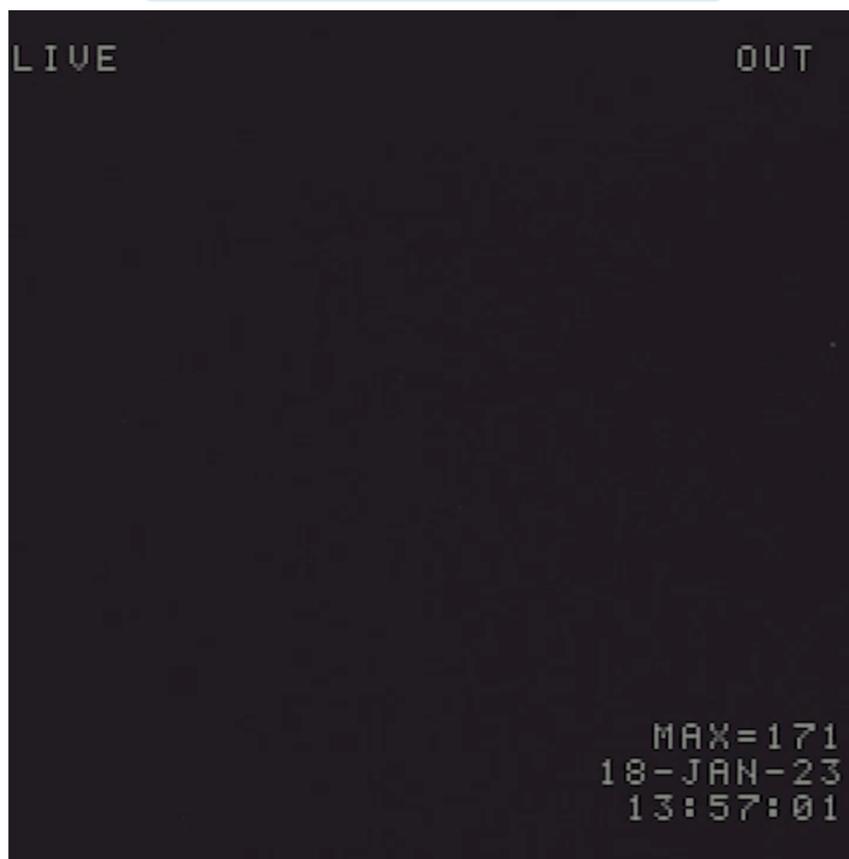
実際のサイロと接地金属棒



PP 約3 mm
 $\rho_v : 10^{15} \Omega m$

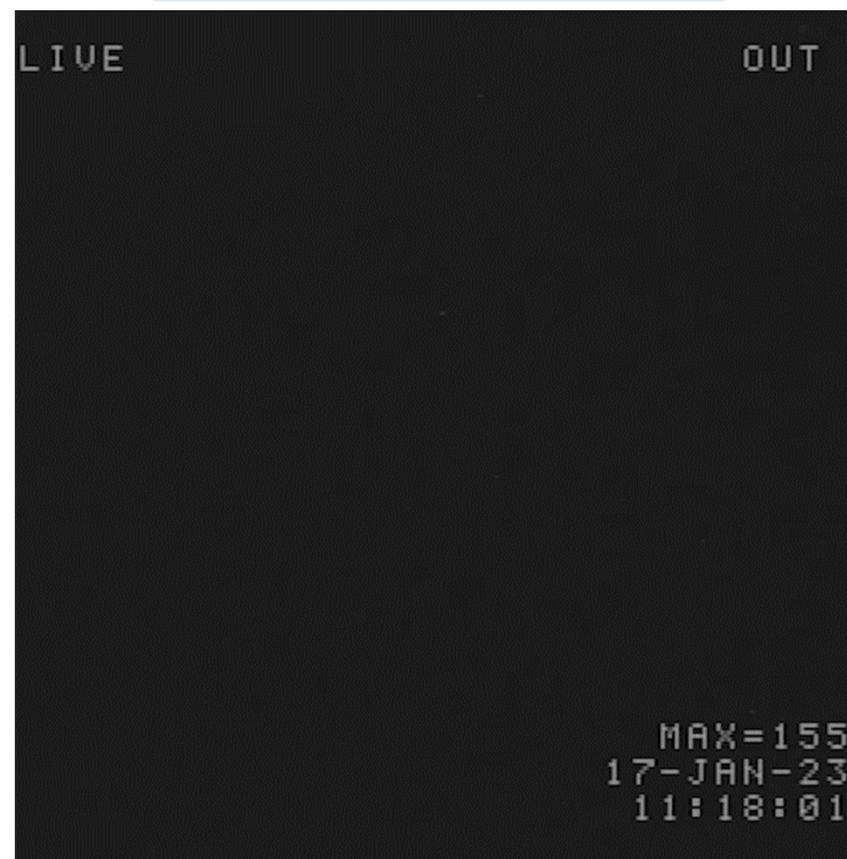
金属棒の有無による放電への影響

金属物なし



10x

金属棒 4本

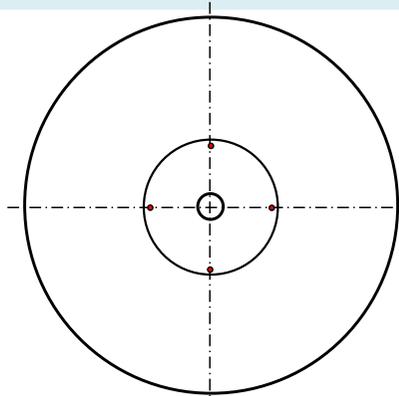


10x

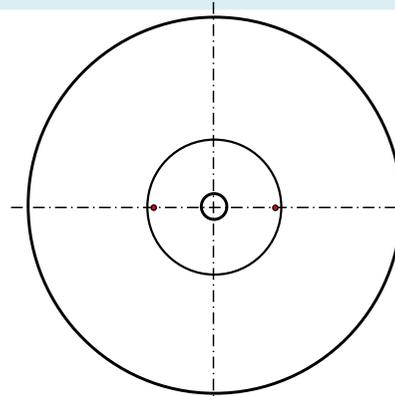
金属棒取付けによって高エネルギー放電は消滅
金属棒近傍で断続的にブラシ放電が発生

金属棒の本数による影響

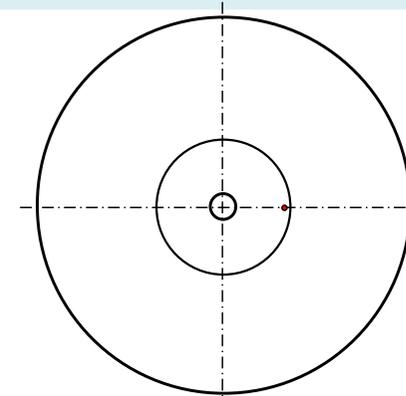
金属棒 4 本



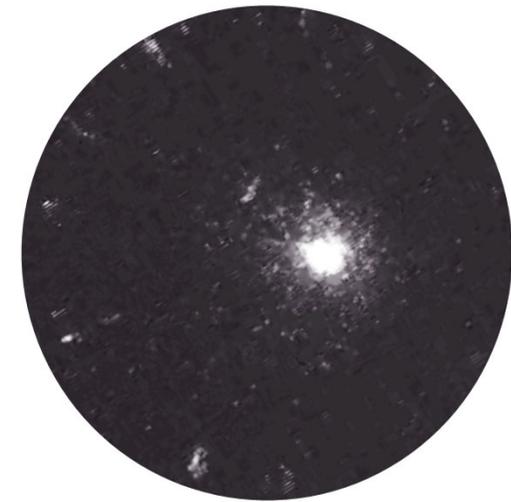
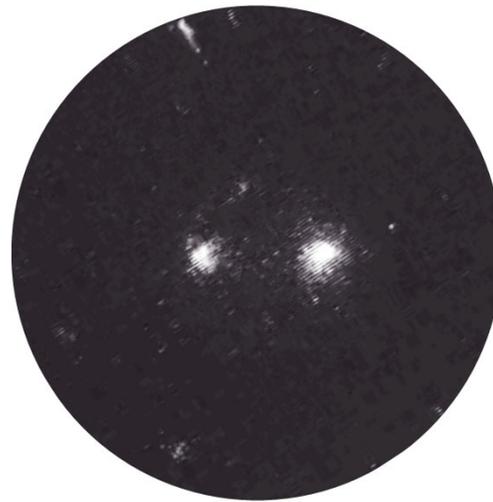
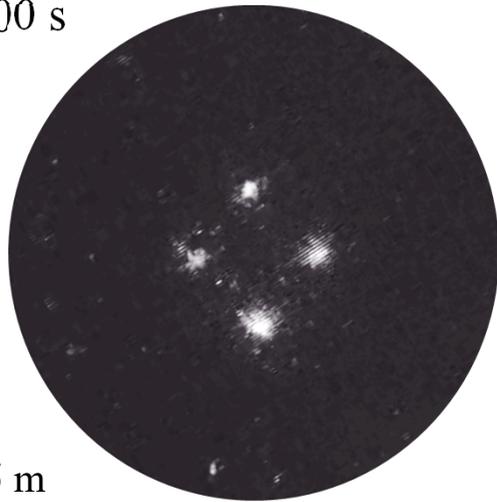
金属棒 2 本



金属棒 1 本



$t = 1000 \text{ s}$

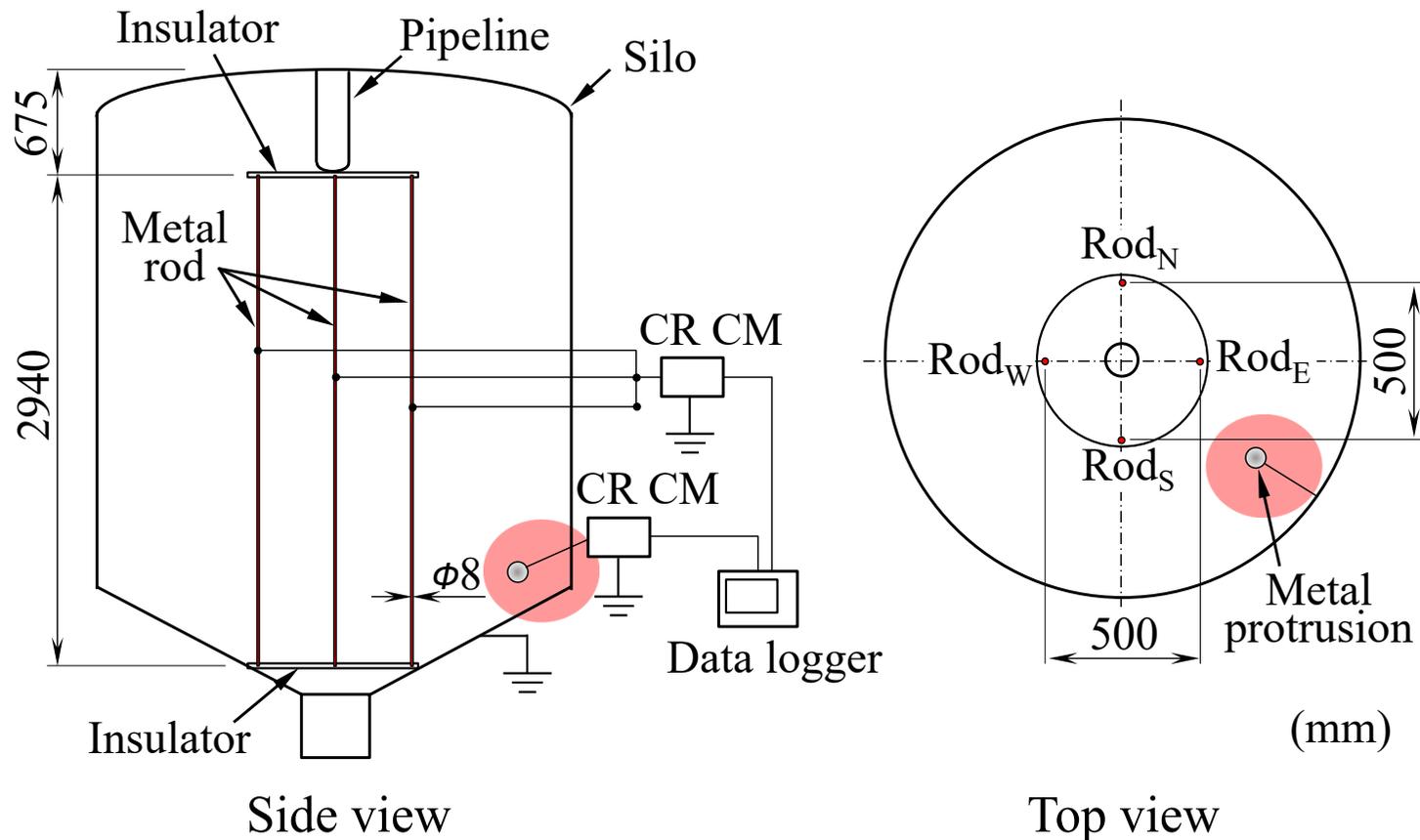


0.5 m

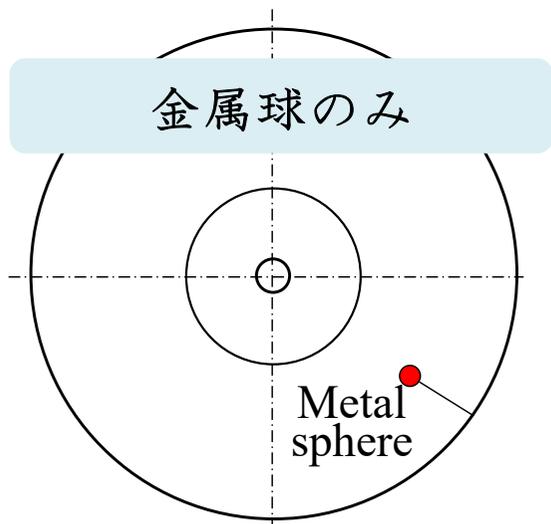
1 本でも高エネルギーのバルク放電は抑制

金属球がある場合

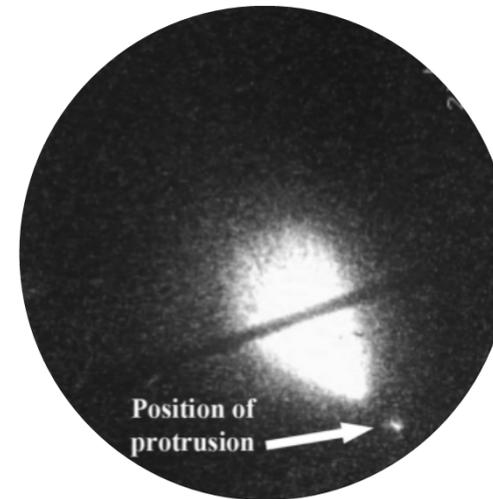
金属球 + 金属棒 4 本



金属球取付け時の放電



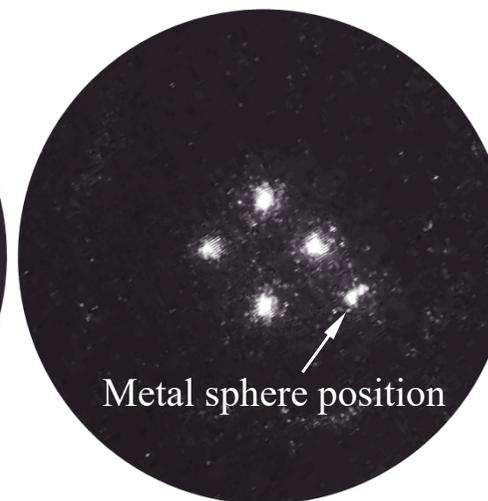
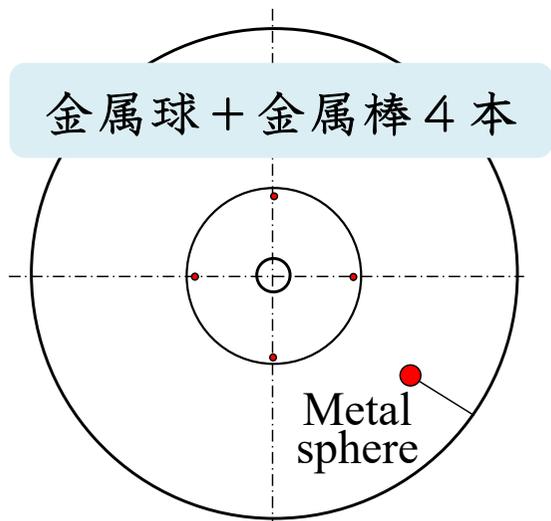
$t = 500 \text{ s}$



$t = 100 \text{ s}$

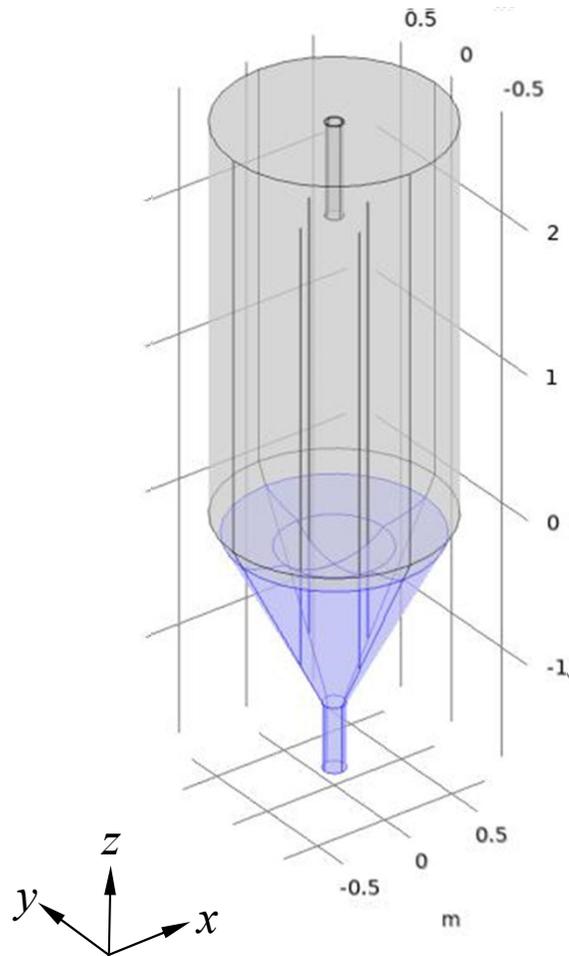
$t = 500 \text{ s}$

$t = 1000 \text{ s}$

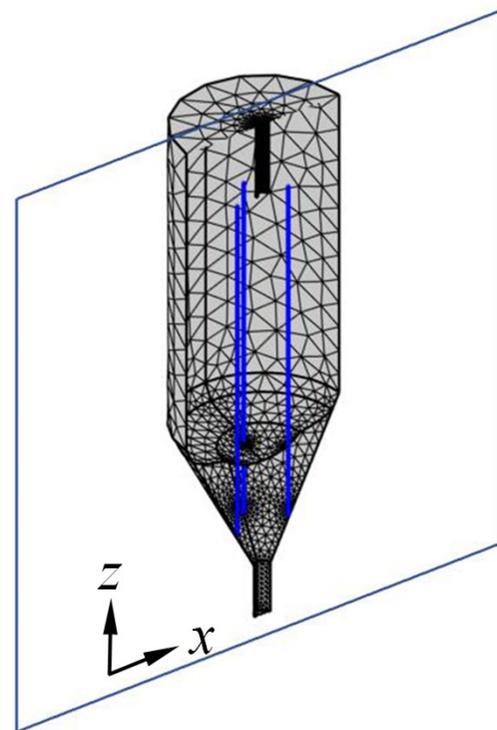


500-720 sで高エネルギー放電消滅 → ブラシ放電

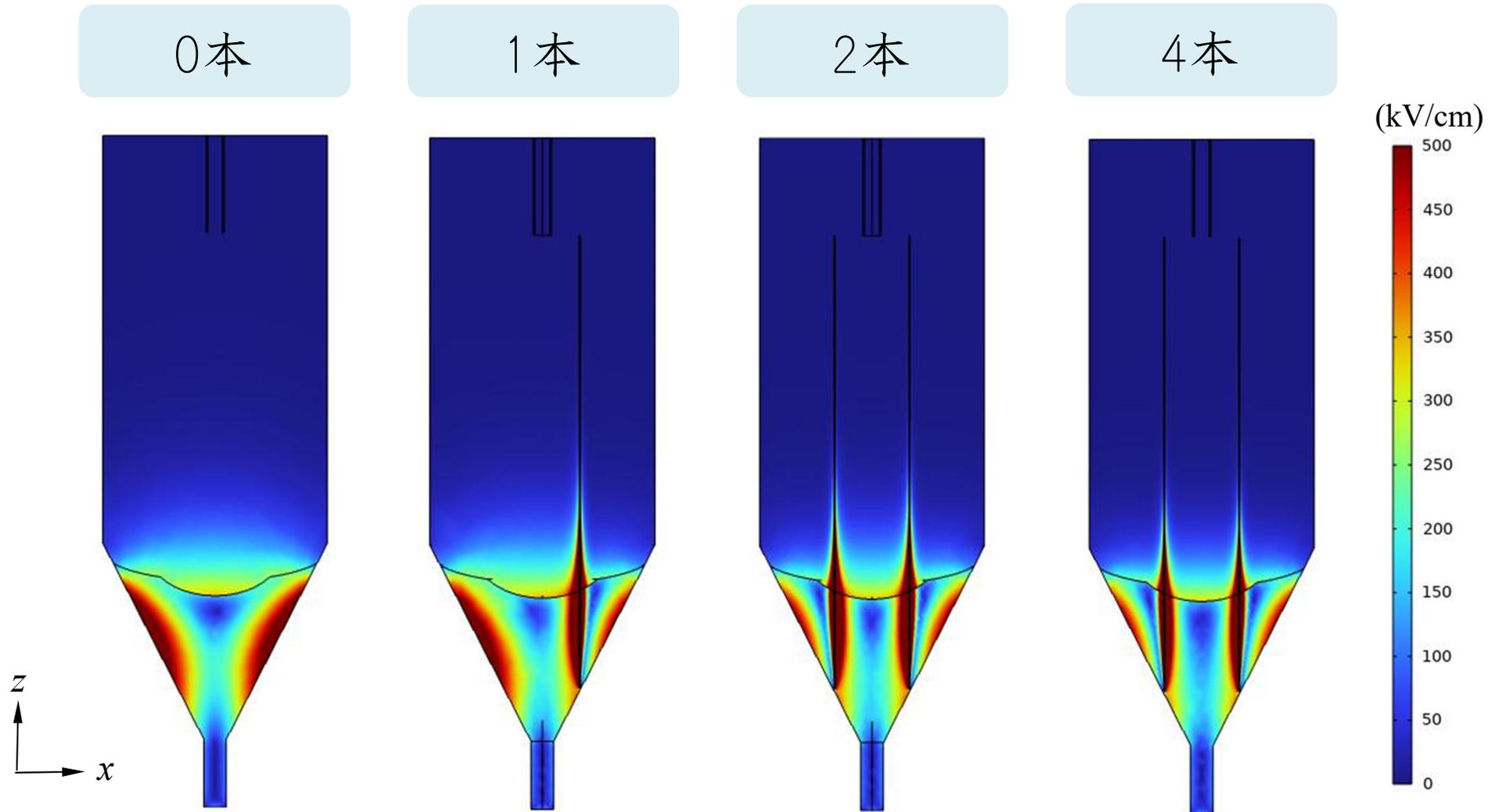
電場解析



有限要素法による3D電場解析 (COMSOL Multiphysics)
サイロ、投入配管、金属棒の位置と寸法は実験と同じ
粉体充填量は面状バルク表面放電が頻発する400 kg
堆積粉体の表面形状は実験で撮影した画像から取得
堆積粉体の電荷密度は実験値 $-6600 \mu\text{C}/\text{m}^3$
サイロ壁、配管、金属棒の電位をゼロ
電荷緩和は考慮しない

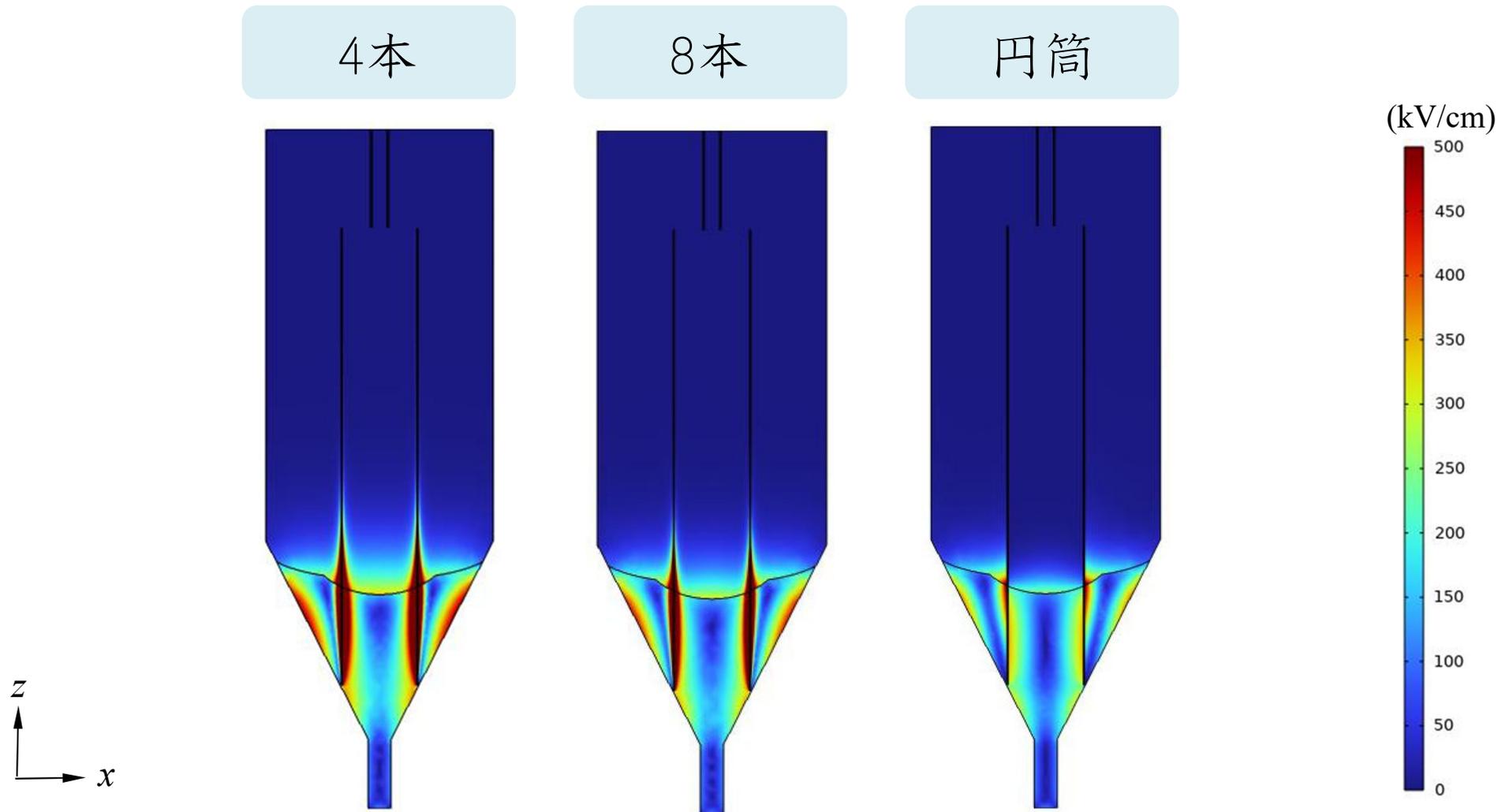


解析結果



棒の均等挿入によって近傍傾斜壁の電界強度が低下
本数増加によって電界強度が低い範囲が拡大

解析結果



棒の周方向範囲拡大によって局所的な電荷蓄積が緩和
→ 放電エネルギー分散効果

接地金属棒を1本以上設置すればコーン放電はほぼ消滅

本数を増やすことでブラシ放電のエネルギーも小さくなる

他の接地金属物にも効果あり

本日の内容

粉体の充填速度

粉体の抵抗率

接地金属棒

配管用除電キャップ

未発表の内容を含むため
割愛させていただきます。

ご清聴ありがとうございました