

粉体充填・投入時の 静電気現象とその防止対策

労働安全衛生総合研究所
研究推進・国際センタ、首席研究員

崔 光石（工学博士）

I 静電気による火災の発生状況

粉体関連設備・装置の大型化・高速化に伴い、大量の粉体が帯電し、それに起因する静電気災害が問題となっている。

火災・爆発事故のデータベース
(1995年～2004年)



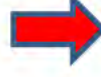
爆発・火災の総数
(792件)



最も多い場所:
化学工場(46件)



静電気災害
(80件)



最も多いプロセス:
原料などの投入(17件)

Ⅱ 静電気による爆発・火災の事故事例(1)

① 新潟県上越市で発生した爆発火災事故

- ・ 発 生 日 : 2007年3月20日
- ・ 当時の作業 : メチルセルロースなど化学製品の製造
- ・ 被害状況 : 鉄骨4階建ての建物から出火、17人負傷。
近隣の民家の窓ガラス等が破損し、1人負傷。

.....
(参考URL : www.shinetsu.co.jp/j/news/s20070419.shtml、
www.47news.jp/CN/200703/CN2007032001000815.html)

② 茨城県鹿嶋市で発生した工場火災

- ・ 発 生 日 : 2012年3月19日
- ・ 当時の作業 : 化学物質の粉末を機械でふるいにかける作業
- ・ 被害状況 : 工場内の製品倉庫全焼、2人死亡、1人火傷。

.....
(参考URL : www.47news.jp/CN/201203/CN2012031901002318.html)

Ⅱ 静電気による爆発・火災の事故事例(2)

③ 愛知県武豊町で発生した爆発事故

- ・ 発 生 日 : 2009年11月14日
- ・ 当時の作業 : 火薬原料の調合
- ・ 被害状況 : 爆発により1人死亡

.....
(参考URL:www.nof.co.jp/upload_public/nws/20091105003_taketoyojiko.pdf、
www.47news.jp/CN/200911/CN2009110401001058.html)

④ 三重県伊賀市で発生した爆発事故

- ・ 発生日 : 2012年7月3日
- ・ 当時の作業 : 製造ラインにたまったアルミ粉末の排出
- ・ 被害状況 : 排出スイッチを押した直後の爆発により、バグフィルタ設備、他の製造ライン等が大破。2人軽傷。
隣接する物流センターの2人も軽傷 (耳・のどに痛み)

.....
(参考URL:www.minalco.co.jp/、
<http://mainichi.jp/area/mie/news/20120704ddl24040166000c.html>)

- ### ⑤ 国外 : 粉体空気輸送の貯蔵設備で爆発事故、 死亡 : 14名、負傷 : 数十人

参考：労働安全衛生総合研究所「爆発火災データベース」

1995	滋賀県	缶コーヒーの乳化剤の製造工場において、粉体ミキサーにポリ袋入りショ糖エステルを投入し、次に移ろうと振り返った直後、ホッパーから火炎が噴出して周囲を焼損し、作業員3名の作業服が燃え火傷を負った。原因は、ミキサー内のショ糖エステル粉じんがポリ袋との摩擦帯電による静電気の放電により粉じん爆発したと考えられる。
1996	大阪府	ワニス製造工場において、溶解混合槽(1000 L)内にメチルエチルケトンを仕込み、クラフト紙3層の袋入りの固形エポキシ樹脂粉の投入作業中、残った樹脂を落とそうとして袋を振った際に爆発し、作業員がやけどを負った。原因は、粉体投入時に静電気火花が発生し、メチルエチルケトンに引火したものと考えられる。
1997	兵庫県	化学工場内の反応器において、エポキシ化合物製造のためマンホールから原料粉体の投入をしていた際、粉体のポリエチレン袋を再利用したため、帯電していた静電気が着火源となって、先に投入してあったジオキサンの蒸気が爆発し、作業員が爆風で飛ばされて死亡した。
1998	新潟県	医薬品工場医薬品中間体を合成する作業において、フレキシブルコンテナ入りの原料粉末の投入のため、反応器上部にある投入シュートのホッパーから原料を自然落下させていたところ、2袋目の時に投入シュート内で着火して火炎が噴出し、周辺の原料に延焼して2階作業場を全焼し、ホッパー脇にいた2名が火傷を負って死傷した。原因は、シュート管の内面がテフロン加工されフレコン内袋が絶縁性材料であったため静電気が帯電し、原料粉末との間で放電したとみられる。
1999	東京都	医薬品原薬工場反応器に溶媒(nヘプタン、トルエン)を仕込み後、マンホールからジソピラミド(常温で白色の粉体)を投入作業中、反応器内で着火して火炎が噴出し、2名が火傷などを負った。原因は、溶媒の蒸気が粉体原料に帯電していた静電気が放電した際の火花により着火したと推定される。

2000	神奈川県	写真フィルム薬品の製造工場において、酢酸エチルが入った反応釜へ粉体原料の投入中、反応釜内から火炎が発生し、投入作業員4名が火傷を負った。原因は、ファイバードラム内のビニール袋に粉体原料が入っており、投入時の摩擦で静電気が発生して金属部分に放電し、釜内の酢酸エチルに引火したと推定される。
2001	徳島県	医薬品製造工場において、有機溶剤(ジオキサン)の入った反応釜の投入口から、粉末状の原料(7袋を予定)を投入していたところ4袋目で突然爆発し、原料の投入作業を行っていた2名が火傷を負った。原因は、フレコンバックに帯電防止加工が無く、摩擦により静電気が発生し、反応釜内部で気化したジオキサンに引火、爆発したと推定される。本作業は非定常作業で、中断した反応を再開させるものだった。
2002	静岡県	製薬工場において、反応釜(7700 L)内に酢酸エチル600 Lを入れ、2名が手作業で上部のマンホールからファイバードラム入りの粉体原料の投入中、反応釜で爆発が発生して火炎が噴出し、2名が火傷を負い、飛散した容器により工場の天井部分約20 m ² が壊れた。反応釜の破損はなかった。原因は、気化した酢酸エチルが粉体原料の2重ポリ袋に帯電した静電気火花により引火したとみられる。
2003	静岡県	香料工場内において、顆粒状の製品の実験試作で、ヘプタンを含浸した製品を作業員2人で製品の収納容器から真空乾燥機のドラムへ投入作業中、投入口付近から爆燃が発生し、その火炎により、作業員2人と傍らで立ち会っていた営業社員1人の計3人が火傷を負った。原因は、アースとの接続を怠ったため収納容器内部の2重のビニール袋に帯電した静電気の火花により、気化したヘプタンが着火したとみられる。
2004	岐阜県	化学工場内の乾燥設備室において、電子機器材料の半製品(ウェット状の粉体)からトルエンを除去するため、半製品が入ったフレキシブルコンテナをクレーンで吊り下げ、底部を開封して乾燥タンク内に投入作業中、爆発・火災が発生して火傷を負い死亡した。原因は、前回バッチの余熱によりトルエンが半製品から気化し、静電気帯電防止服と靴を被災者は着用していたが、フレコンには帯電防止対策や接地がされてなく、投入時の静電気帯電により、着火したと推定された。

Ⅲ 粉体貯蔵設備(サイロ)における静電気現象

粉体プロセスにおいては、自動化、省力化、クリーン化が求められ、粉体空気輸送設備がよく用いられている。

メリット


- ・連続且つ安定した輸送が可能
- ・複雑な制御が不要
- ・複数個所への分散輸送が簡単

空気輸送時に粉体と配管との摩擦・衝突により発生する大量の静電気は、生産障害や災害につながる。サイロに充填する工程では、着火性静電気放電が発生する可能性がある。

本研究の目的及び内容

静電気放電によるサイロ内での粉じん爆発・火災を防止の一助となることを目的として、実規模の粉体空気輸送装置を使用し、**粉体**をサイロに**連続投入**した際の**静電気放電を可視化・分析**を行う。

産業現場

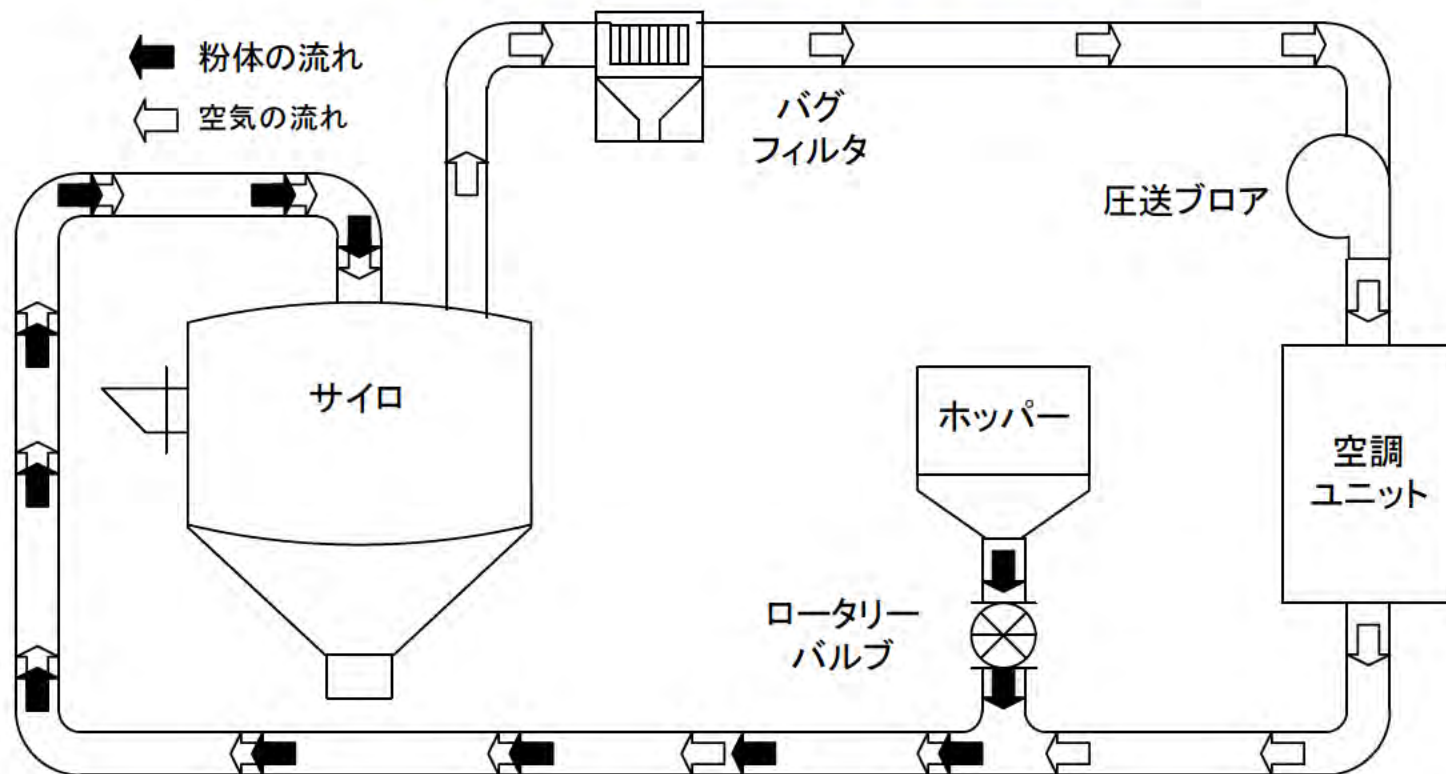


サイロ内で発生する**静電気放電の危険性**の認識の向上

本研究の特徴および社会への貢献

- 他研究機関で類似研究は実施されていない。
- 労働現場、行政(労働局、労働基準監督署)からのニーズが高い。

実験設備および方法



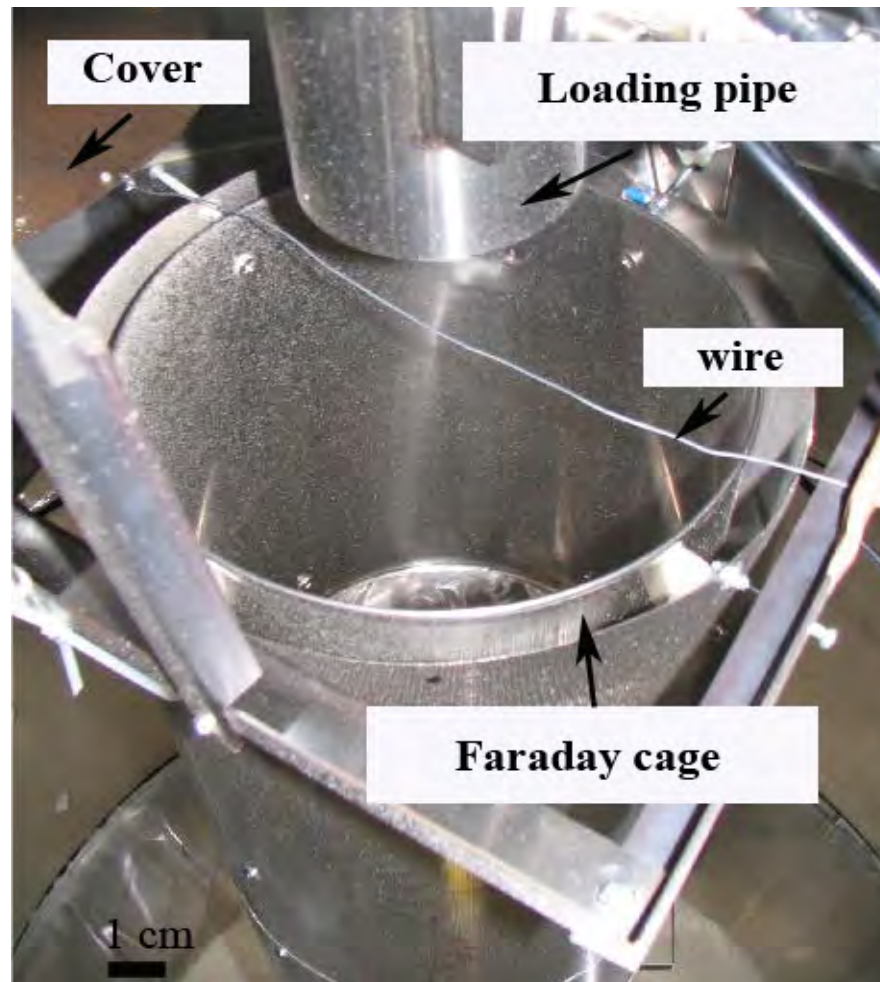
実規模粉体空気輸送実験設備

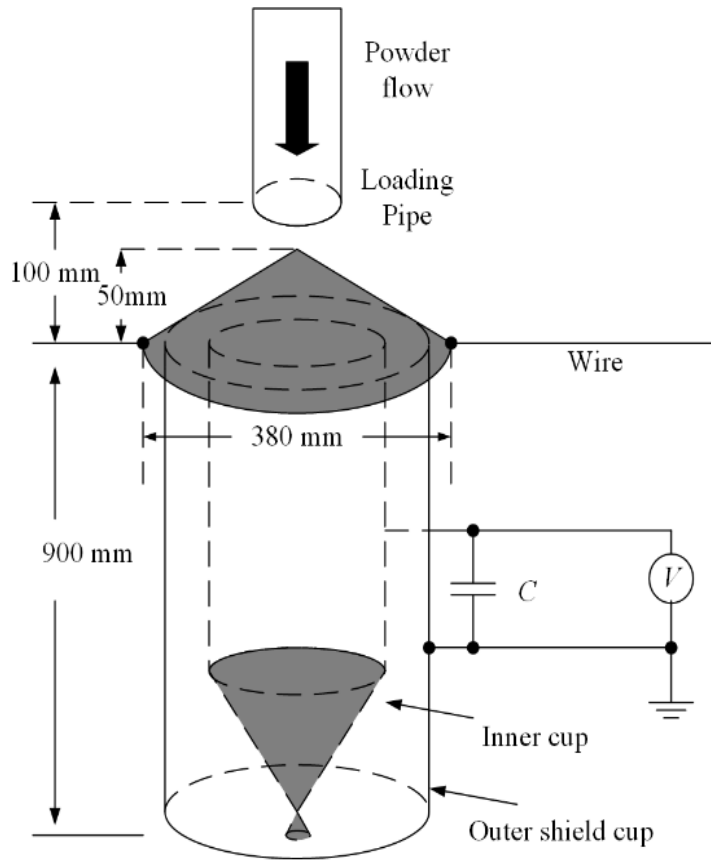
- ・空気温度: 30 °C
- ・空気湿度: 30 %
- ・空気風量: 11.5 m³/min
- ・粉体の供給量: 約0.68 kg/s
- ・粉体を投入ホッパーに入れ、ロータリーバルブを回転させて配管内に流す。その後、圧送ブロアによって、配管内に粉体を空気輸送し、サイロに連続投入する。



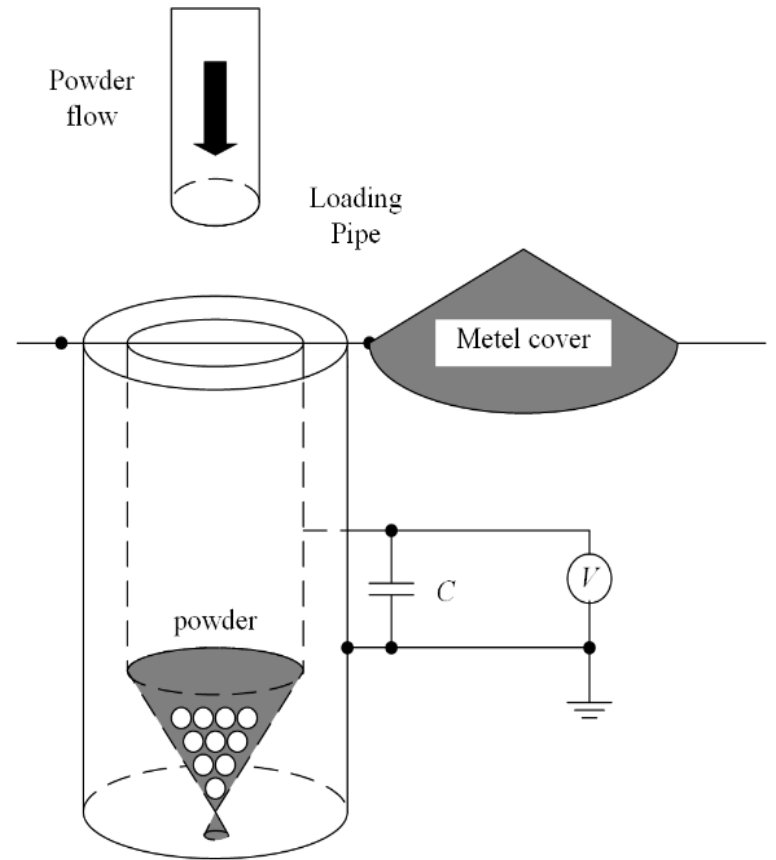
ポリプロピレン(PP)粉体
約850 kg

投入粉体の静電気帯電測定



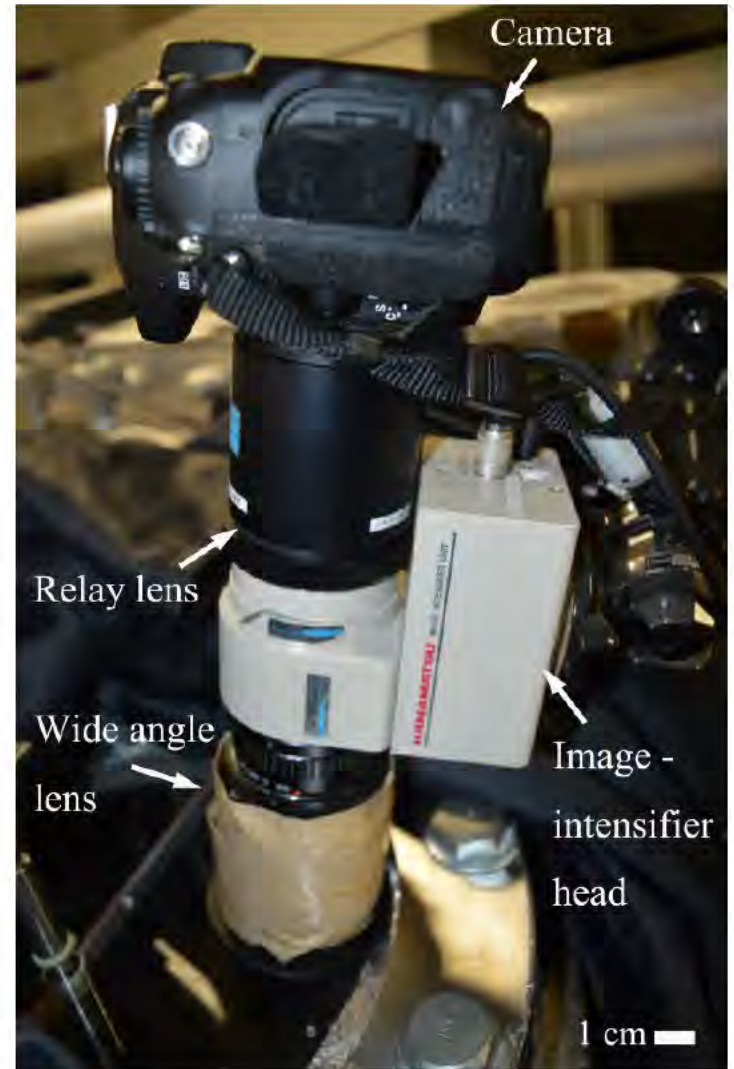
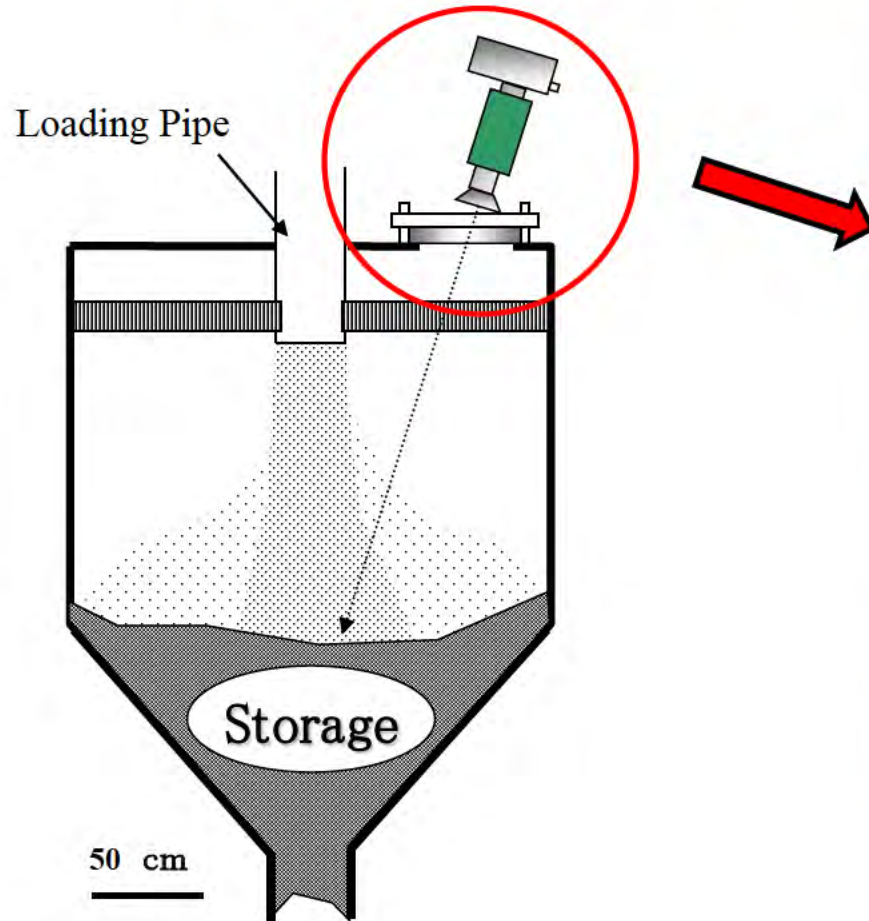


(a) When the cover is on



(b) When the cover is off

サイロ内での静電気放電の撮影



実験結果および考察

静電気帯電量

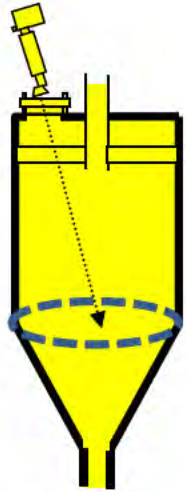
No.	Q [mC]	M [kg]	q [mC/kg]
1	-26.5	2.16	-12.26
2	-26.3	2.30	-11.43
3	-24.8	2.12	-11.69
Avg.	-25.8	2.19	-11.78

- PPはSUS304配管と摩擦すると、負に帯電する特性をもっている (ステンレス:仕事関数:4.7 eV, PP粉体:5.4 eV)。
- 投入粉体の q は、約-12 $\mu\text{C}/\text{kg}$ であり、**充填時間**にはよらず**一定**であった。
- q が約1~2 $\mu\text{C}/\text{kg}$ *を超えると粉体サイロ内で着火性静電気放電が発生する可能性が高い。

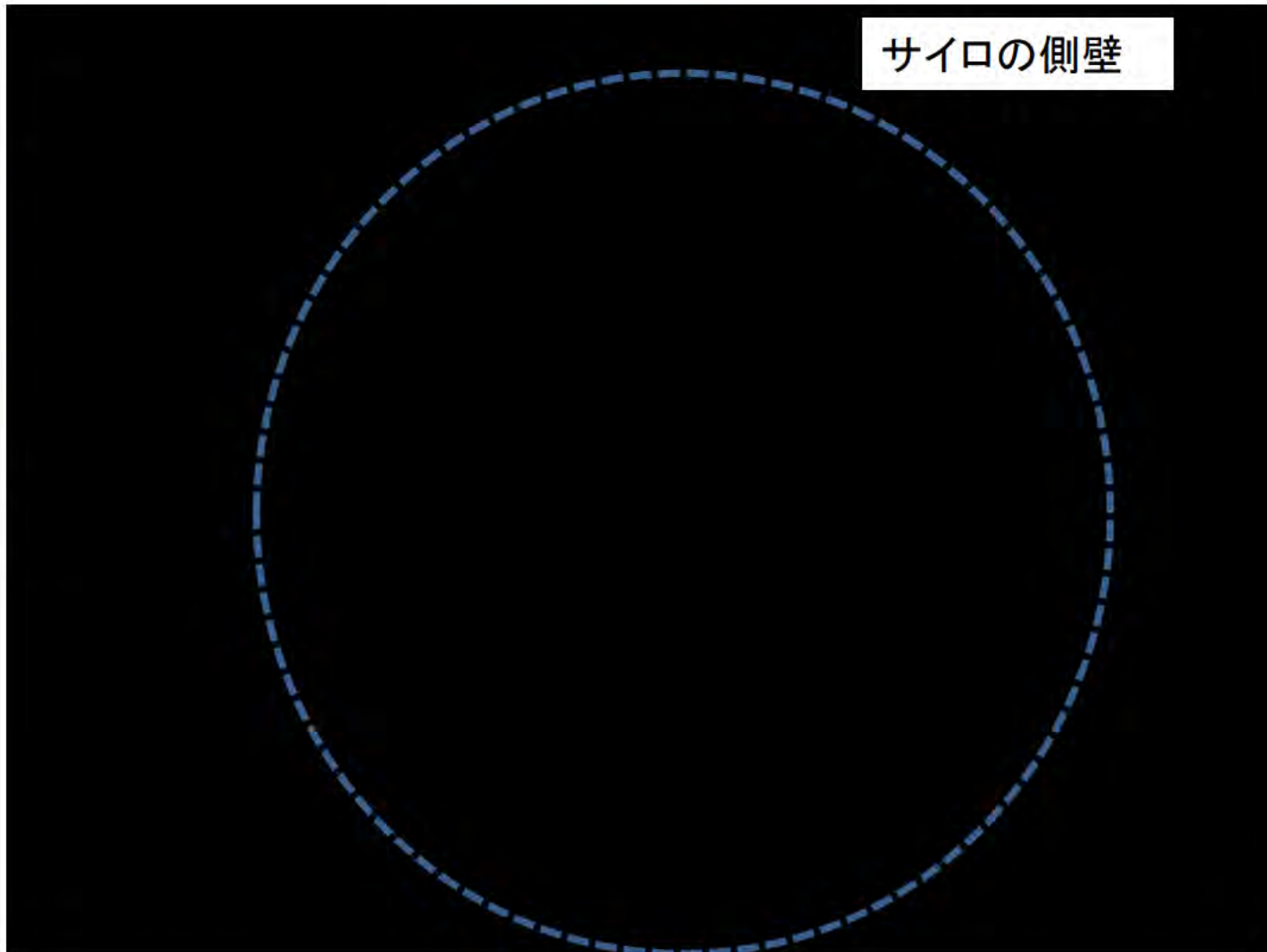
*Choi et.al, J.loss prevention in the process industries, Vol.32, pp.1-4

静電気放電

8 times fast
forwarded **video**



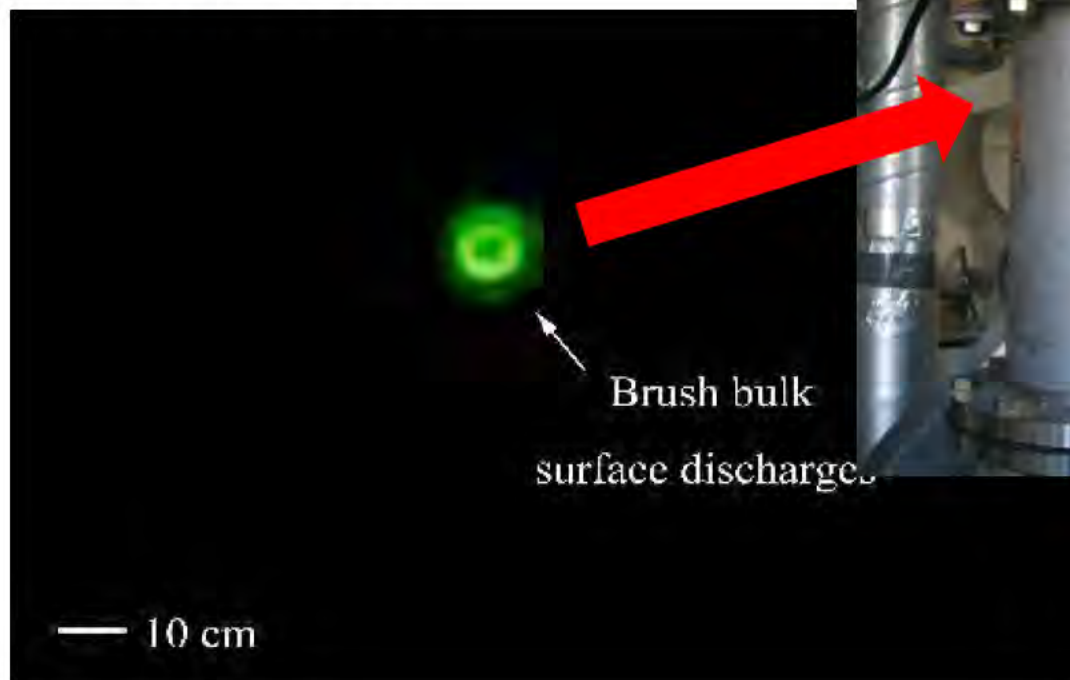
Night viewer
was tilted at
an angle



- 40 kg/min of PP was loaded continuously into the silo until it reached 850 kg.

ポイント1

Gain 7, 露出時間 2s



5 kg, 約7 s*

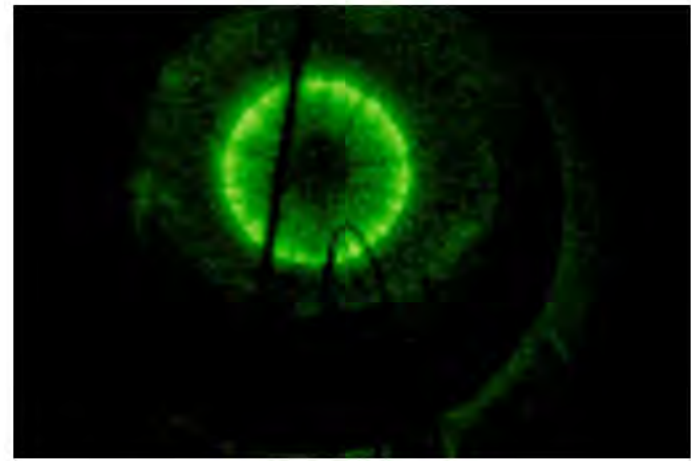
粉体をサイロ内に投入直後、明らかな静電気放電が観測された。

.....
*サイロに粉体投入からの経過時間を示す。

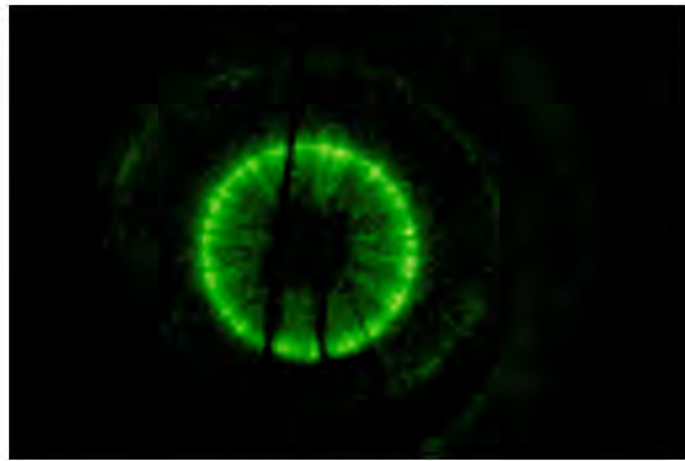
ポイント2



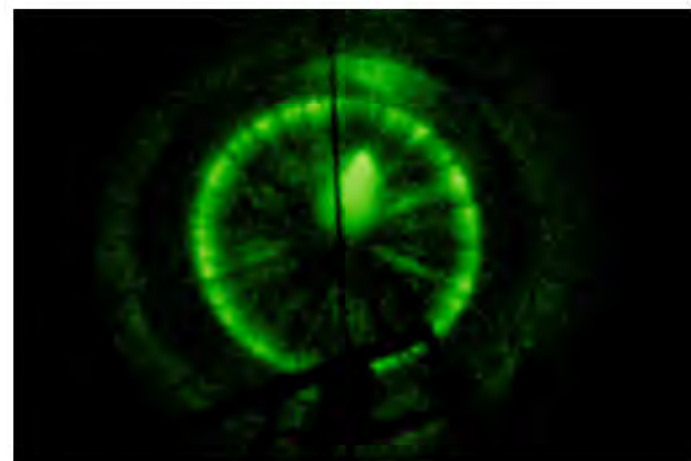
5 kg, 約7 s



50 kg, 約80 s



50~100 kg, 約150 s



100~200 kg, 約310 s

発光の直径は、堆積時間と共に変化しているが、これは粉体が堆積していく過程で堆積粉体の直径が変化しているからである。

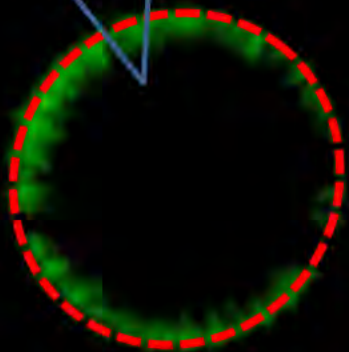
静電気放電の分類

① ブラシバルク表面放電

=ブラシ放電

It occurred conspicuously between the grounded metal silo wall and settled PP powders.

粉体をサイロ内に投入している間はいつで発生する(特に、投入初期と終了間際)。

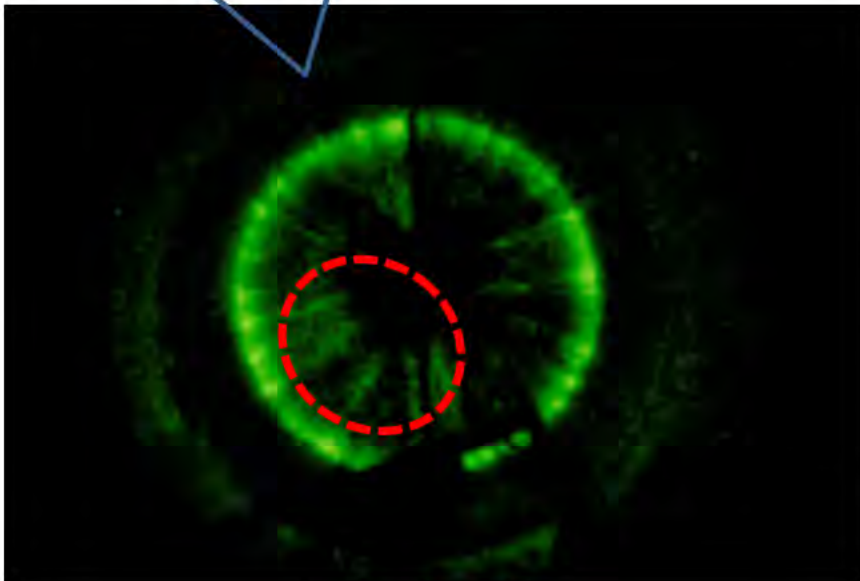


- 接地されたサイロの側壁と堆積した帯電粉体の接触部分で集中的に発生する。
- 放電エネルギーは最大4 mJ程度である。一般の可燃性のガス、溶剤蒸気のほかに、粒径が数十 μm 以下の一部の可燃性粉体の着火源になり得るが、特に着火危険性が高い可燃性粉体以外には可燃性粉体の着火源にはならない。

② 線状バルク表面放電

=ストリーマ放電

Linear bulk surface discharges occurred between the wall and the center of silo.

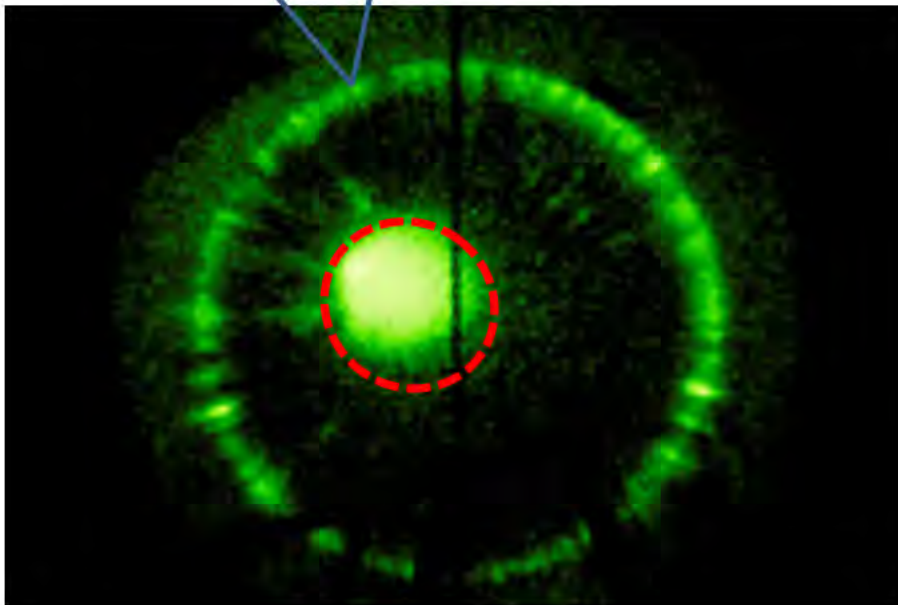


投入初期と終了間際を除くいつでも発生する。

- ブラシ放電が強くなり伸展したもの。
- 堆積粉体の中央部と側壁との電位勾配が大きくなり、サイロ側壁で発生したブラシ放電がストリーマ状に直線的に堆積粉体の中央部に向かって延びたものである。

③ 面状バルク表面放電

Almost all broad bulk surface discharges occur around the center of the silo, only occasionally.



放電エネルギー W [mJ]

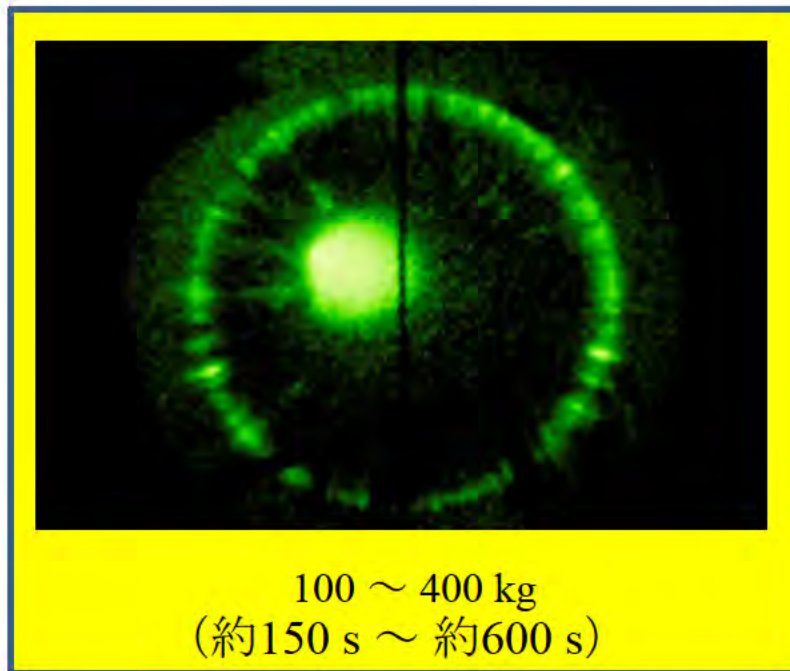
$$W = 5.22 D^{3.36} d^{1.46} \quad (1) \text{ — — — — — 式1}$$

ただし、 $0.5 \text{ m} < D < 3 \text{ m}$, $0.8 \text{ mm} < d < 3.0 \text{ mm}$).

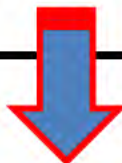
投入中期時に発生する

- 主に、線状放電の先端部から放電が発生していない堆積粉体の表面に広がる。
- 線状放電の先端部で毎回発生するものではなく、先端部近傍の堆積粉体の帯電量が十分大きい時にだけ発生するものである。
- バルク表面放電の放電エネルギーは、貯蔵槽の直径 D [m] と粒径 d [mm] に依存する。今回、使用した粉体貯蔵槽の D は 1.5 m, d は 2 mm であり式(1)より W は 56 mJ となる。

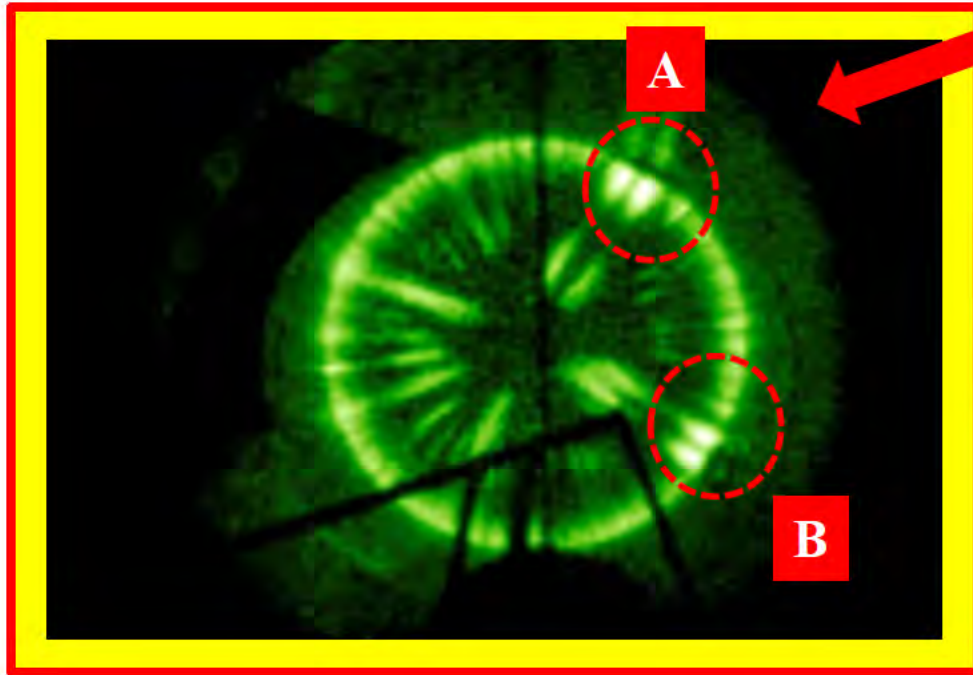
ポイント5



- ・粉体試料の投入を開始後、166秒から発生し始め、その後しばしば現れた(堆積粉体の直径:約0.98 m)。
- ・再現性を確認した結果、ばらつきはあるものの、いずれも、170 s前後でこの面状バルク表面放電が発生し始める。



・今後詳しい分析が必要である。



突起物 (12 mm in diameter)

静電気災害の防止対策に関する研究

① 着火性静電気放電の検出

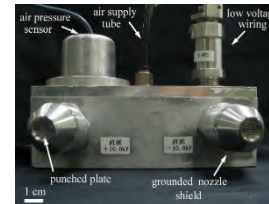
光センサー静電気放電検出装置



.....
K.Choi, Review of scientific instruments. 85.4 (2014).

② 着火性静電気放電の抑制

粉体用双極性除電器



.....
K.Choi, J. of Loss Prevention in the Process Industries. Vol.40, pp. 502 – 506 (2016).

③ 窒素置換による着火防止

静電気放電による粉体の最小着火エネルギーに
ページ用窒素濃度が及ぼす影響

.....
K.Choi, J. of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 34. pp.163-166 (2015),
Vol.35. pp.232-235 (2015) and Vol.41, pp. 144 – 146 (2016).



双極性防爆構造除電器の開発

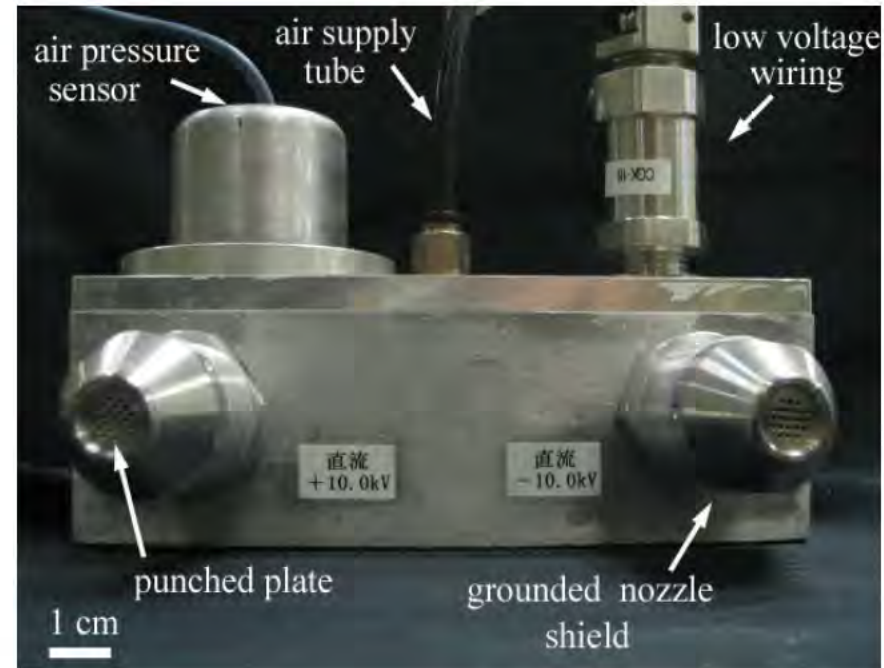
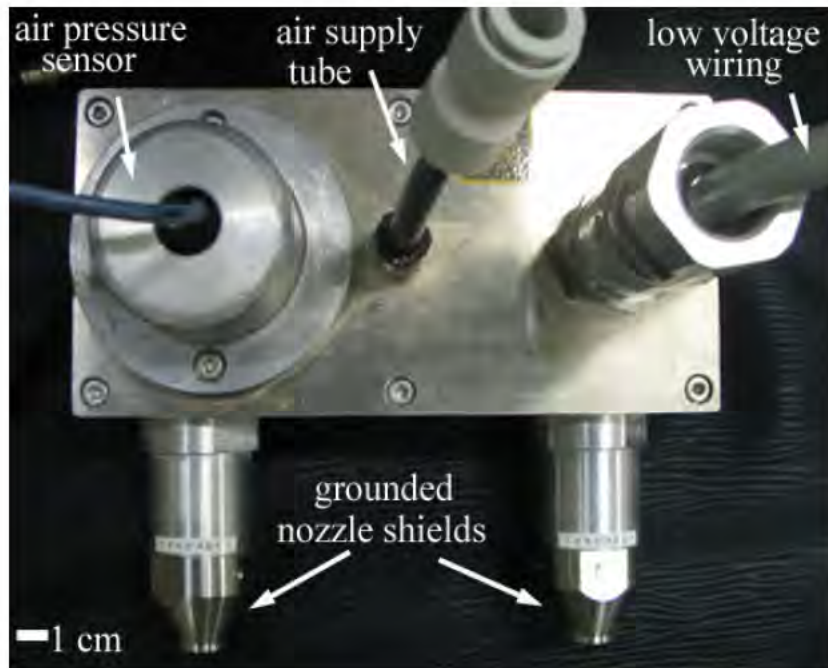
□ 除電器: 帯電した物体の静電気を除去する機器

□ 双極性除電器

2本のノズル電極の一方から正イオンを、もう一方から負イオンを噴出

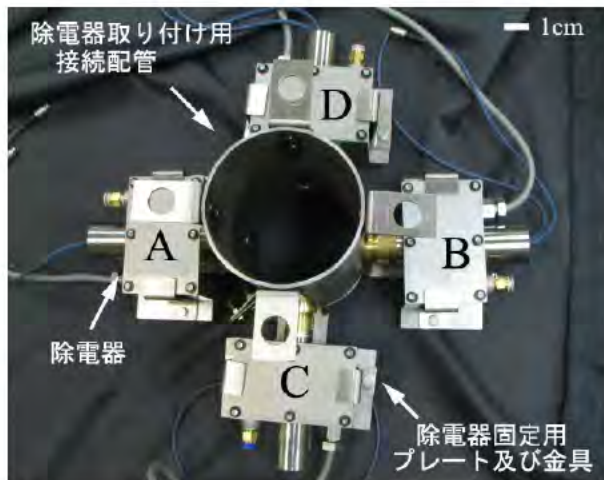
□ 防爆構造除電器

爆発性雰囲気内で使用しても**着火源とならない除電器**

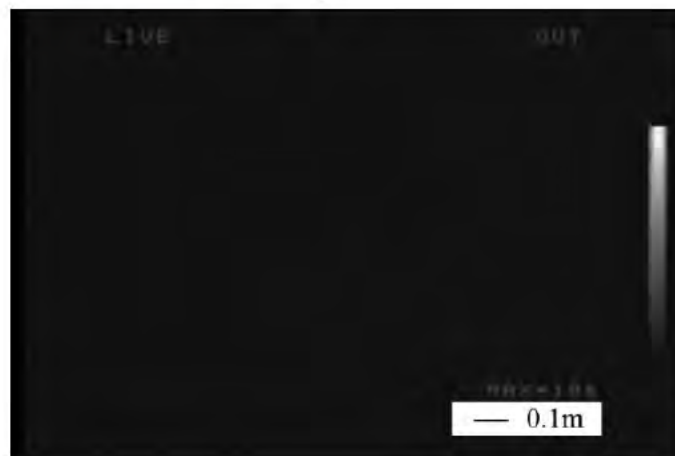
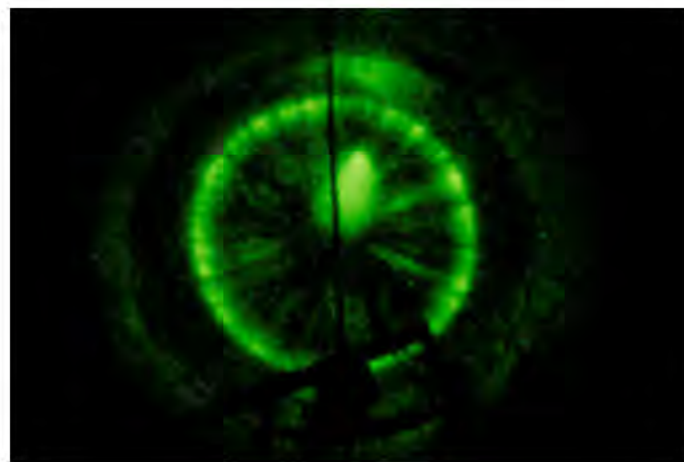


双極性除電器の外観

除電器off



除電器on



双極性除電器による静電気放電の抑制効果

◆ 双極性除電器は
産業現場での静電気放電による災害の防止に有効である。

IV まとめ

実規模の粉体空気輸送装置を使用し、粉体をサイロに連続充填・投入した際に発生する静電気放電の現象とその防止対策について調べた。

- 投入粉体の比電荷は、約 $-12 \mu\text{C}/\text{kg}$ で、かなり高く、サイロ内で着火性静電気放電が発生する危険性が高い。
- 粉体試料をサイロに投入した直後から、静電気放電が発生し始める。
- その後、粉体がサイロに投入・堆積していく過程で、サイロ内で発生する静電気放電は、大まかに2種類に分けられ、ブラシ放電、バルク表面放電である。このバルク表面放電においても、さらに2種類に分類でき、線状放電と面状放電である。
- 粉体用双極性除電器によるサイロ内の静電気放電の抑制が確認された。