

災害調査報告書

配管検査用スプレー缶爆発災害

独立行政法人
産業安全研究所

1. 略

2. 災害の概要

(1)～(3)

(4)災害発生時の状況

被災者 A 及び B は、原子力発電所の定期点検の一環として、水没弁の浸透探傷試験（PT = Liquid Penetrant Testing）を実施した。同試験では、図 1 に示すように、検査対象部分に朱色の染料を含む浸透液を吹き付け、その後、洗浄用溶剤を用いて余剰浸透液を除去し、最後に白色の無機微粒子を含む現像液を吹き付ける。もし、亀裂があれば、そこから浸透液が毛細管現象により吸い出され、無機微粒子が染色されるという原理に基づく非破壊試験法である。浸透液、洗浄液、及び現像液はそれぞれ手持ちサイズのスプレー缶として国内数社から販売されており、本件においても 3 社のスプレー缶を使用していた。

同被災者らは浸透探傷試験を終え、使い残したスプレー缶を空にして廃棄するという作業を実施した。これは、原子力発電所内での検査であったため、放射性物質による汚染を危惧して、当該作業で用いたスプレー缶が他所で使用されることのないようにするためであり、通常行われる作業であった。本件廃棄作業は、建屋内に本点検のために臨時に設けられた作業エリア（床に使い捨てシートを敷き、高さ 1 m の合成樹脂（EVA）シートに囲まれた約 4.5 m × 2.5 m 区画）の中でスプレー缶の残留物をポリ袋に向かって全量噴霧し、空缶を更に底部に穴を開け、踏みつぶすというものであった。

災害発生直前、被災者らは、約 30 分をかけて 25 個のスプレー缶（洗浄液 12 個、現像液 13 個）をポリ袋に向かって噴霧し空にした。その後、噴霧した内容物による異臭が甚だしくなったため、危険と判断して噴霧作業を中断し、空缶を踏みつぶしてポリ袋に入れる作業に切り替えた。そして、2～3 分後、二人は噴霧作業を再開した。A が新たなポリ袋（中に空にすべきスプレー缶が入っていた）の口を開いたのとほぼ同時に爆発が発生し火災となった。そのとき、被災者 B は同 A から 1 m 程離れた場所で、作業中断前に使用していたものと同じポリ袋に向かって現像液缶を噴霧している最中であつた。人的な被害は上記の通りであつたが速やかに消火作業を行ったため、図 2 に示すように、作業エリアの一部が焼損する程度の被害に留まり、建屋等への延焼は免れた。

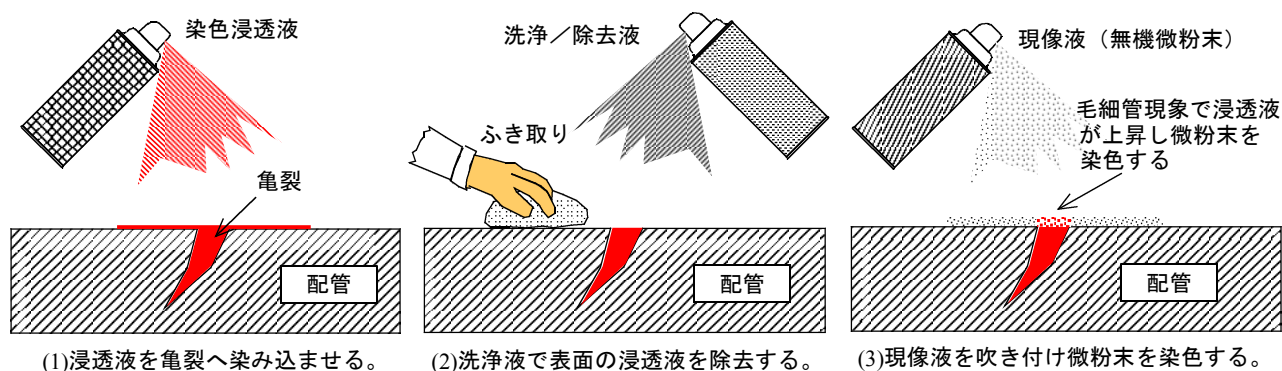


図 1 浸透探傷試験の原理



図 2 消火後の作業エリアの状況

(5) 実況検分の概要

現場には他に可燃性物質が存在しないことから、スプレー缶に含まれていた揮発性の可燃性物質、特に噴射剤として使用されていた LPG (Liquid Petroleum Gas) または DME (Dimethyl-ether) が滞留し、これに何らかの着火源で発火したものと推定された。災害発生時には現場付近では火気は存在しなかった。また、建屋内にあった蛍光灯、投光機、電工ドラム、局所排気装置等の電気設備・機器からはこれらが着火源となった痕跡は発見されなかった。従って、裸火、高温物体またはアーク等の電気火花によるものではないと推定された。

(6)その他の参考事項

①気温・湿度

被災現場の建屋内では温度及び湿度の計測設備はなかった。近隣の石巻測候所の気象データによれば、同日ほぼ同時刻において気温及び湿度はそれぞれ約 3℃ 及び 50%（水蒸気濃度 3 g/m³）であった。現場では常時外気をほぼ一定温度に昇温して建屋内に供給しており、後日の計測によればその温度は 28℃～29℃ であった。また、同計測では外気の温湿度 5.9℃ 及び 56.6%（水蒸気濃度 4 g/m³）に対して屋内の湿度は 12%であったことから、気象データから判断して、災害発生時点においては 10%を下回る湿度であったと推定される。

②作業に用いたスプレー缶の種類と残存量

被災時に既に処分していた 25 個の処分前の残量は定かではないが、現場に残されていたスプレー缶の内容量は表 1 に示すとおりであり、かなりの量が残存しており、なかにはほとんど使われないまま処分されるものもあったようである。

表 1 被災現場から押収したスプレー缶リスト

測定数値	新品数値	差指数値	内容量	残 量	備 考
378.9	414.3	35.4	310	274.6	
119.3	383.1	263.8	300	36.2	キャップなし
420.6	441.1	20.5	335	314.5	溶解物付着
421.9	441.1	19.2	335	315.8	
383.7	407.7	24.0	310	286.0	キャップなし
267.8	409.2	141.4	430	288.6	キャップなし
434.6	441.2	6.6	335	328.4	
431.3	441.2	9.9	335	325.1	
401	414.3	13.3	310	296.7	
395.3	414.3	19.0	310	291.0	
377.3	414.3	37.0	310	273.0	
265.7	382.9	117.2	265	147.8	
424.8	441.1	16.3	335	318.7	
342.4	414.3	71.9	310	238.1	
134.4	409.2	274.8	430	155.2	キャップなし
237.2	414.3	177.1	310	132.9	
198.6	382.9	184.3	265	80.7	
393.8	414.3	20.5	310	289.5	
372.1	371	-1.1	420	421.1	キャップ・ボタンなし
396.5	407.7	11.2	310	298.8	キャップ・ボタンなし
384.9	376.3	-8.6	265	273.6	キャップなし、溶解物付着
237.8	425.6	187.8	430	242.2	
265.3	409.2	143.9	430	286.1	キャップなし
201.9	373	171.1	420	248.9	キャップ・ボタンなし
248.5	373	124.5	420	295.5	キャップ・ボタンなし
210.9	387.5	176.6	280	103.4	
305.3	373.6	68.3	420	351.7	キャップなし
112.5	396.9	284.4	300	15.6	
401.3	441.1	39.8	335	295.2	
216.6	383.9	167.3	265	97.7	
319.3	414.3	95.0	310	215.0	
105.4	396.9	291.5	300	8.5	
197.9	409.2	211.3	430	218.7	キャップなし
388.6	382.9	-5.7	265	270.7	溶解物付着
150.6	577.9	427.3	460	32.7	
348.2	373.6	25.4	420	394.6	キャップなし
145.4	425.6	280.2	430	149.8	
228.9	419.3	190.4	300	109.6	
237.1	419.3	182.2	300	117.8	
171	385.9	214.9	270	55.1	
118.1	364.4	246.3	250	3.7	
122.2	419.3	297.1	300	2.9	

以上のように、災害現場での湿度が低かったこと、ならびに作業者の着衣・履物、床材等の電気抵抗が極めて大きいものであったと考えられることから、人体、スプレー缶並びに器具類が帯電しやすい条件であったと推定されるので、静電気放電が着火源となった可

能性は排除されない。また、本件では、静電気の発生源としてスプレー缶の噴霧が挙げられるが、この点に関しては従来定量的なデータがほとんどなく関連性を判断することが困難な状況である。スプレー缶の噴射剤として、かつては不活性なフロンが一般的に使用されていたが、フロンはオゾン層破壊物質であることから法的に使用が禁止された（1988年、「特定物質の規制などによるオゾン層の保護に関する法律（オゾン層保護法）」）ため LPG または DME といった極めて引火性の高い物質へとシフトしてきた。もし、本件作業で使用されたスプレー缶による帯電が災害を引き起こすようなレベルであれば、同様の災害が再発するおそれもあるので、この機会にスプレー缶噴霧時の帯電量の測定及び帯電に影響を与える因子を押さえ、必要であれば関係者に対して警鐘を鳴らすとともに、技術的に可能であれば帯電防止対策を確立する必要があると考えられる。

なお、スプレー缶は家庭及び産業廃棄物として処理する際に内容物が漏れて引火・爆発することがあるので、多くの自治体では廃棄する前に内容物を使い切ることを指導しており、旧労働省も平成 12 年 3 月 14 日付基発第 127 号（「産業廃棄物処理業等における爆発・火災の防止について」）を以て関連事業所における災害防止対策を徹底すべき旨通達を出し注意を喚起している。しかし、一般的な爆発危険性に関する研究論文[1]はあるものの、災害との関連でスプレー缶噴霧時の静電気に関して調査した論文・資料はほとんどないのが実情であり、現時点で労働現場で静電気対策を意識する機運が高まっているようには見受けられない。

3. スプレー缶の特徴

3.1 構造

本件で用いられた浸透探傷検査用スプレー缶の構造は、図 3 に示すように、各メーカーとも種類に関係なく全く同一の形状及び材質であった。このような構造は、1 リットル以下の簡易なスプレー缶にほぼ共通のものである。缶の内部では、液化ガスである噴射剤の一部が気化して高压（通常 20℃ で 0.2～0.3MPa 程度）となっているので、指でノズル頭頂部を押下してバルブが開くと原液と噴射剤の溶液（懸濁液の場合もある）がノズルから噴出する。空気に触れると噴射剤は急速に気化し、その際の膨張圧力によって原液は速やかに霧化される。すなわち、噴射剤は溶液を押し出す圧力を生み出すとともに、霧化するために必要な作用も担っている。現在、噴射剤として最も一般的に用いられているものは LPG 及び DME である。これは、これらの物質が毒性が低く、比較的小さい圧力で液化することができ、化学的に安定であり、また溶剤としても優れているという利点があるからである。

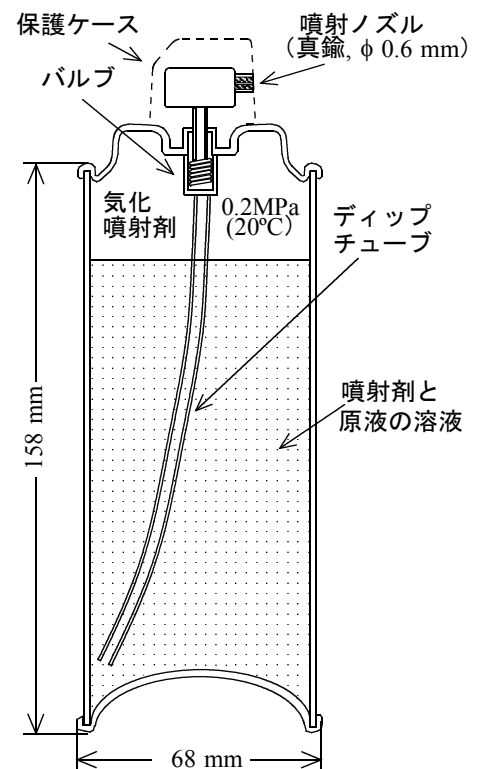


図 3 スプレー缶の構造

本件災害現場で用いられていたスプレー缶は、いずれも「高压ガス保安法」第 3 条に定める同法の適用除外品であり、「高压ガス保安法施行令関係告示」第 4 条の規制に適合す

るものであった。従って、容器は以下の条件を満足している。

- (1) 35℃において内容物の圧力が 0.8 MPa 以下。（ただし、フルオロカーボンは 2.1 MPa 以下）
- (2) 50℃における内容物の圧力の 1.5 倍で変形せず，1.8 倍で破裂しない。
- (3) 充填されたガスを 48℃にしたときガスが漏れない。
- (4) ガスの名称とともに適切な排出方法を鮮明に表示し，バルブにはキャップ，ロック等の保護措置を有する。
- (5) 枠を設けて少なくとも次の事項が表示されている。

- ① 温度が 40℃以上となるところに置かないこと。
- ② 缶の温度を 40℃以上に上げないこと。
- ③ 火の中に入れないこと。

3.2 内容物

浸透探傷検査に使用されるのは，3種類の液剤，即ち，染色浸透液（以下，浸透液），洗浄／除去液（以下，洗浄液），及び現像液である。本件災害時には国内メーカー3社のものが使用されていた。そこで，これら3社の各3種のスプレー缶について，各社が発行している MSDS（Material Safety Data Sheet = 化学物質安全性データシート）を入手した。製造元によって成分に若干の違いが見られるものの，以下の共通した特徴が認められる。

- (1) 浸透液には，染色用としてアゾ系赤色染料が原液の最大 5 wt%程度含まれる。また，比較的沸点の高い炭化水素系溶剤（C₁₀～C₁₄）を中心に，グリコールエーテル，フタル酸ジオクチル等を含む。アゾ系赤色染料は溶剤に分子レベルで溶解（dissolution）している。噴射剤は DME である。
- (2) 洗浄液には，沸点が低く揮発性が高い炭化水素系溶剤（ヘプタン）が使用されている。ただし，唯一，A 社は，炭化水素系溶剤に加えて，アルコール（エタノールを主に IPA を少量）を原液の 30%程度含む。噴射剤は LPG である。
- (3) 現像液には，炭酸塩類及び二酸化珪素を主成分とする数種の白色の無機微粉末（粒径数 μm）が原液の最大 10 wt%程度含まれている。溶剤として揮発性の高いアルコール（エタノールを主に IPA を少量）及び炭化水素系溶剤（ヘプタン）の混合液を含む。無機微粉末は非溶解性であり，使用前に缶を十分振動し攪拌することにより溶剤中では均一な懸濁液（suspension）をなす。噴射剤は LPG である。

表 2 略

表 3 爆発危険性の高い噴射剤及び溶剤の主な物性値（文献値）[2]

物質名	化学式	分子量	融点 [°C]	沸点 [°C]	引火点 [°C]	発火点 [°C]	最小着火エネルギー [mJ]	爆発限界 [vol. %]		蒸気密度	臨界温度 [°C]	臨界圧力 [MPa]
								下限	上限			
DME	CH ₃ OCH ₃	46.07	-141.5	-24.82	-41	240	0.29	2.0	27	1.59	129.0	5.32
プロパン	C ₃ H ₈	44.10	-187.7	-42.07	-104	432	0.25	2.1	9.5	1.52	96.7	4.25
n-ブタン	C ₄ H ₁₀	58.12	-138.3	-0.50	-72	365	0.25	1.5	8.5	2.00	152.0	3.80
n-ヘプタン	C ₇ H ₁₆	100.2	-90.61	98.43	-4	204	0.24	1.0	6.7	3.46	-	-
エチルアルコール	CH ₃ CH ₂ OH	46.07	-114.5	78.32	12	363	-	3.3	19	1.59	-	-
IPA	(CH ₃) ₂ CHOH	60.10	-90	83	11.7	455	-	2.0	12.7	2.1	-	-

これらスプレー缶に噴射剤として使用されている DME 及び LPG 並びに原液に含まれる可燃性物質のうち、量的に多く、かつ揮発性の高いヘプタン、エチルアルコール及びイソプロピルアルコール (IPA) の主な物性値を表 3 に示す。安全上注目されるのは、いずれも空気よりも重いので滞留しやすく、かつ、0.2～0.3 mJ の微弱な放電エネルギーで引火するという点である。（アルコール系溶剤については常温で十分な蒸気圧が得られないので最小着火エネルギーの測定が困難であり、公表値も入手することができなかったが、静電気の放電火花で着火した災害事例はある[3]。）なお、DME と LPG は飽和蒸気圧の他に溶液との相互溶解性に違いがあるので内容物の成分によって使い分けがなされている。

（参考）噴射剤用のブタンは、ノルマルブタンとイソブタンの混合物であり、混合比はおおよそノルマル：イソ＝70:30 である。20℃においてブタンは 0.14 MPa、プロパンは 0.75 MPa の飽和蒸気圧を有する。これをブタン：プロパン＝80:20 にすると 0.2 MPa、70:30 にすると 0.35 MPa となる。混合比と飽和蒸気圧に関する理論式または実験式はなく、経験的なものである。混合比は顧客の要望によって変化するが、一般には 80:20 が多いようである。

4. 作業時に用いられた用品類の静電气的特性

絶縁物の場合、静電気の帯電（発生及び蓄積）に最も影響を与える物性値は抵抗または抵抗率である。本件災害においては、図 4 に示すように、スプレー缶処分用の作業エリアで使用されていた床材（ゴムマット及び難燃シート）、作業員が着用していたゴム長靴及びゴム手袋ならびにスプレー缶の内容物を噴霧していたポリエチレン袋（以下、ポリ袋）が静電气的に最も重要と考えられたので、これらの抵抗または抵抗率（体積及び表面）を実測した。また、ゴム手袋については、加えて絶縁破壊電圧を測定した。これらの測定結果を表 4 に示す。

ゴムマット及び難燃シートの抵抗率はやや高く、たとえ静電靴等の導電性の高い履き物であっても十分な帯電防止効果は期待できない。ゴム長靴は靴底の抵抗が $10^{12} \sim 10^{13} \Omega$ と

非常に大きいので、床の抵抗に関係なく、いったん何らかの原因で人体が帯電した場合には、長時間にわたって電荷が緩和（消滅）されずに残留する。また、ポリ袋も抵抗率が非常に大きいので、導電性の高い物質が付着しない限り、袋内に電荷が蓄積された場合には容易には緩和しないであろう。ゴム手袋は、人体とスプレー缶の間に入るものであり、作業時の物理・化学的な刺激を受けて傷つきやすく、また、材質が薄い(0.25 mm)のでスプレー缶の帯電電位によっては絶縁破壊を起こす可能性が高い。測定によれば絶縁破壊電圧は 13 kV であったが、絶縁破壊に至らなくとも、図 5 に示すように体積抵抗率は印加電圧が大きくなると大幅に低下するので、スプレー缶が数 kV 以上に帯電した場合には、スプレー缶から人体へ容易に電流が流れるものと考えられる。

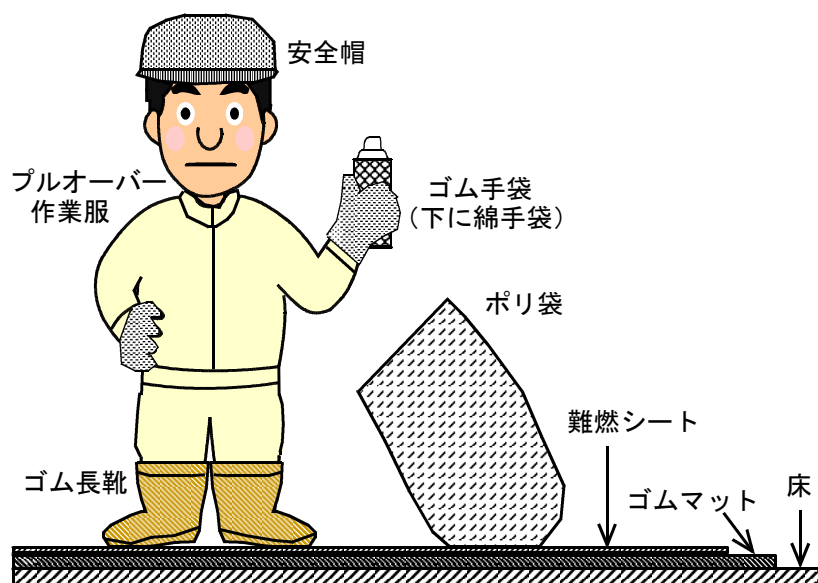


図 4 作業員の着衣及び作業エリアの床の構成

表 4 主な物品の抵抗及び抵抗率の測定値

（環境条件： 22.8 ℃， 38.0%）

1. 難燃シート（厚さ 0.135 mm）

（材質は非公表。元素比は C:59%, H:9%, N:17%, O:15%）

(1) 体積抵抗率

印加電圧 [V]	体積抵抗率 [Ω·m]
10	1.2×10^{12}
100	7.1×10^{11}
1000	3.5×10^{10}

(2) 表面抵抗率（光沢面）

印加電圧 [V]	表面抵抗率 [Ω]
500	8.6×10^{14}
1000	6.5×10^{14}

(3) 表面抵抗率（非光沢面）

印加電圧 [V]	表面抵抗率 [Ω]
1000	3.3×10^{14}

（注）光沢面を上にして使用する。

2. ゴムマット（厚さ 1.60 mm）

材質：ポリ塩化ビニル 43.5 ～ 69%，可塑剤（フタル酸系） 23.2 ～ 29.8%，
 充填剤（炭酸カルシウム） 0 ～ 28.2%，その他（安定剤，着色剤）少量
 （成分比は保護フィルム層，表層，下地層によって異なる）

(1)体積抵抗率

印加電圧 [V]	体積抵抗率 [Ω・m]
100	5.6×10^{10}
500	2.7×10^{10}
1000	9.9×10^9

(2)表面抵抗率（ツヤ緑面）

印加電圧 [V]	表面抵抗率 [Ω]
100	6.1×10^{11}
500	4.9×10^{11}
1000	1.2×10^{11}

(3)表面抵抗率（黒面）

印加電圧 [V]	表面抵抗率 [Ω]
100	7.3×10^{11}
500	3.0×10^{11}
1000	1.5×10^{11}

（注）ツヤ緑面を上にして使用する。

3. ポリ袋（厚さ 0.10mm）

材質：エチレン・1－ブテン コポリマー

(1)体積抵抗率

印加電圧 [V]	体積抵抗率 [Ω・m]
100	2.2×10^{15}
500	1.4×10^{15}
1000	9.8×10^{13}

(2)表面抵抗率

印加電圧 [V]	表面抵抗率 [Ω]
1000	5.1×10^{16}

（注）抵抗が極めて大きい場合には低い印加電圧では測定できないことがあるので、測定可能であった電圧のみ記載しているものがある。

4. 靴底の抵抗

ゴム長靴（合成ゴム製）

測定方法：充電・緩和法

被験者に履物を着用させて導体板に立たせ、一定レベルに充電した後、電位変化を観測する。電位が指数緩和則に従って変化すると仮定すると抵抗 R [Ω]は次式で与えられる。

$$R = \frac{t}{C \ln(V_0 / V)} = \frac{10^{10} t}{2.3 \log_{10}(V_0 / V)}$$

ただし、 C [F]は人体の静電容量(100pF)、 t [s]は時間、 V_0 [V]は初期電位、 V [V]は t における電位。

初期電位 13.6 kV

時間 t [s]	電位 V [kV]	抵抗 R [Ω]
60	12.2	5.5×10^{12}
180	10.8	7.8×10^{12}
300	9.8	9.2×10^{12}
480	8.6	1.0×10^{13}
780	6.3	1.0×10^{13}

注）指数緩和則に従っていれば、時間に関係なく一定の抵抗となるはずであるが、実際には電位依存性が認められる。（電位が高い方が抵抗が小さい。）

（注）当初、電圧・電流法を試みたが、抵抗が大きいため電流が小さすぎて測定不能であったため、充電・減衰法による。

(参考) 静電靴及びスニーカーの抵抗

測定方法：電圧・電流法

履物（片足）を測定用治具に取り付け、電圧 V [V] を印加し電流 I [A] を測定する。

抵抗 R [Ω] は次式で与えられる。

$$R = \frac{V}{I}$$

静電靴

印加電圧 [V]	電流 [A]	抵抗 [Ω]
500	1.5×10^{-5}	3.4×10^7

スニーカー（合成ゴム底）

印加電圧 [V]	電流 [A]	抵抗 [Ω]
1000	1.5×10^{-10}	6.7×10^{12}

6. ゴム手袋（厚さ 0.25 mm）

材料：天然ゴム

印加電圧 [V]	体積抵抗率 [$\Omega \cdot m$]
100	1.0×10^{14}
1000	1.3×10^{13}

絶縁破壊電圧 13 kV

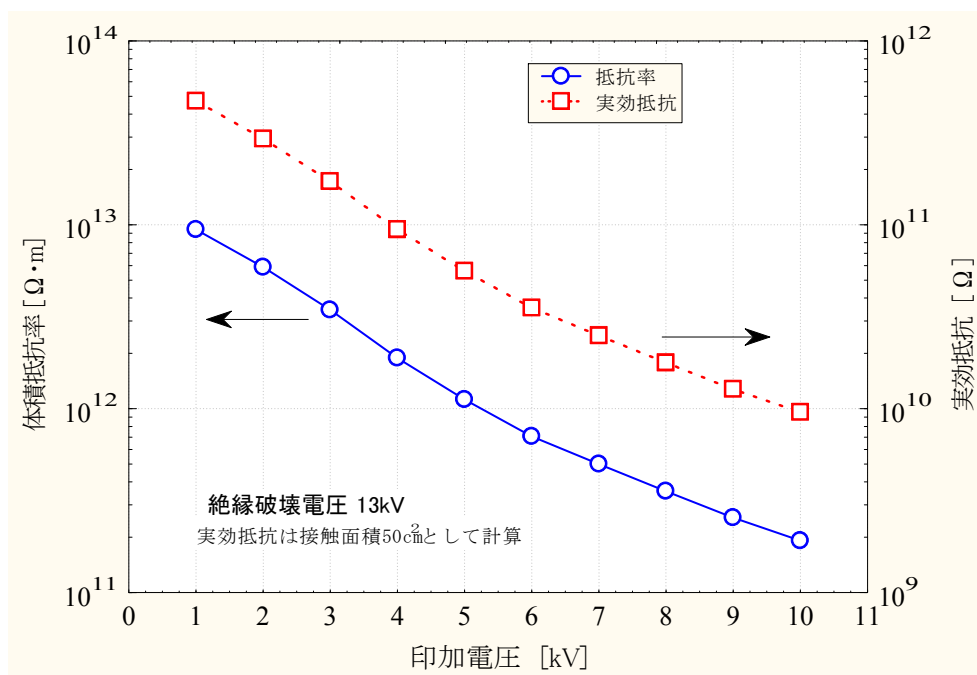


図5 ゴム手袋の抵抗（率）の電圧依存性

5. スプレー缶噴霧時の帯電特性

スプレー缶噴霧時の帯電特性を知るための基礎データとするために、噴霧時にスプレー缶から大地（アース体）へ流れる電流（以下、本報告書に限り「噴霧電流」という）を測定することとした。このような測定に関しては特に規格や慣例的な方法が存在しないため、以下に述べるように独自に実験装置を製作し、測定を行うこととした。

なお、今回は、噴霧後に液滴が更に細かく破碎することによって発生する電荷については測定対象としなかった。これは、測定技術上の問題に加え、スプレー缶及び人体の電位は噴霧電流で決まること、並びにポリ袋に霧化した内容物の全量が入るので、噴霧後に発生した正及び負極性の電荷は相殺されると考えられたためである。

5.1 実験装置及び方法

スプレー缶を保持し、一定の圧力で任意の時間ノズルを押下するために図6に示すような治具（鉄製）を製作した。スプレー缶は治具と電氣的に絶縁するためにテフロンシートで包み、かつ、治具と接触する部分にテフロンシートを挟んだ。スプレー缶の上部には交流ソレノイド（吸引力 3 kgf, ストローク 20 mm）で駆動するプッシュロッドを取り付け、遠隔操作によりバルブの開閉が可能にした。同治具を頑丈なカメラ用の三脚に取り付けることにより、噴霧時の反動によっても動かないようにするとともに、任意にスプレー缶の傾斜角を設定可能なようにした。今回使用したスプレー缶の容器は全て金属製であったので、容器の一部にリード線を接続し、噴霧電流または電荷量をエレクトロメータ（Keithley 6514）で測定した。また、電流の変化をチャートレコーダで記録し、種々の解析を行った。

使用したスプレー缶は、国内3社で特に低ハロゲン・硫黄含有タイプ（ステンレス管の腐食防止用）として製造された浸透液、洗浄液及び現像液の計9種類である。更に、参考のため、浸透探傷試験には直接は関係ないが、本件災害現場で使用されていた他のスプレー缶ならびに特別に充填した噴射剤のみのスプレー缶（LPG 及び DME）についても測定対象とした。

実験装置は屋内に設置したが、噴射物による汚染及び人体への悪影響を防止するため、開放した扉から屋外へ向けて噴射を行った。したがって、実験環境の温湿度のコントロー

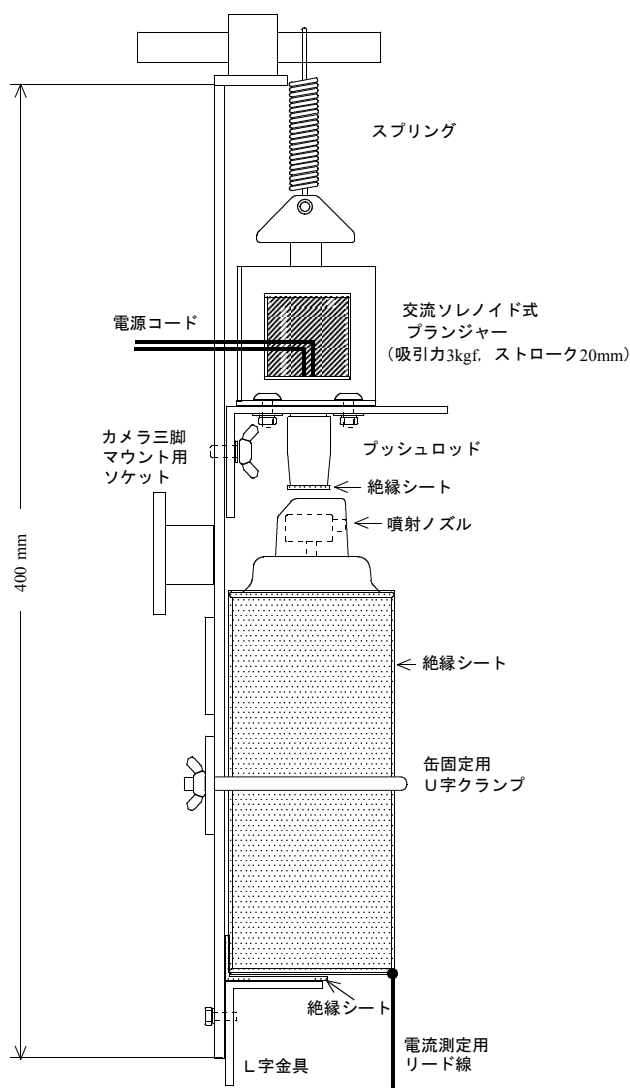


図6 スプレー缶噴霧用治具の構造（側面）

ルは不可能であった。ただし，比較の対象となる実験項目においてほぼ一定の気温となるよう天候に配慮しつつ実施した。

5.2 実験結果及び考察

5.2.1 噴霧時の発生電流の一般的傾向

浸透探傷試験用スプレー缶を用いて，バルブを 10 秒間開放し噴霧したときの噴霧電流を測定した。バルブは毎回完全に開放されるようにプランジャーと缶の位置を調整した（本治具の機構では，バルブの部分的な開放を精密に制御することは困難と判断されたので常に全開放とした。）。現像液用スプレー缶は溶液への無機微粉末の分散を均一にするために治具に取り付ける前に 30 秒以上手で振動し攪拌した。多くの場合，噴霧電流は一定ではなく時間的な変化を示したので 10 秒間の平均値を求め，更に 1 種類につき 3 回以上の実験を行い大まかな変動幅を求めるとともにその平均値を算出した。噴射質量は，1 回の噴射終了毎にスプレー缶を治具から取り外して電子重量計で缶の質量を測定し，噴射前の質量との差をとることにより求めた。

まず，浸透探傷試験用缶の噴霧電流の測定結果を図 7 に示す。このときの環境条件は，気温 30～35℃，湿度 50～80%と高温多湿であった。これによると，現像液では+20～50 nA，洗浄液では -0～5 nA，浸透液では -12～28 nA の電流が得られた。同種の液剤を比較すると大きさには若干の差があるものの極性は等しいことがわかる。現像液及び浸透液に関しては，各社ともに成分はほぼ同様であるが，各成分の配合比が独自であることが噴霧電流の絶対値の差異として現れているものと考えられる。また，洗浄液では D 及び I は約+15 pA と極めて微少な噴霧電流であったが，E のみは安定的に -5 nA 程度の値が得られた。これは前 2 者と後者の内容物の違いによるものと考えられる。すなわち，D 及び I はヘプタン等の無極性の炭化水素のみを含むのに対し，E は極性溶剤であるエタノールを含有していることが帯電特性に影響を与えた要因と考えられる。

噴霧電流が気温の影響を受けやすいことから，比較的涼しい時期を選び，気温 20℃ 前後で再び同様の実験を行った。その結果を図 8 に示す。図 7 との比較で分かるように，噴霧電流はおよそ半分程度にまで低下した。すなわち，スプレー缶の帯電に関しては，作業環境の気温が極めて重要な因子となることが分かった。そこで温度の影響を考慮した実験を別途実施したので，5.2.3 において詳述する。

一方，噴霧物の帯電量に関する情報を得るために，以下の式を用いて，噴霧物が有する単位重さ当たりの電荷量（電荷密度） q [C/kg]を概算した結果を図 9 に示す。

$$q = - \frac{1}{m} \int_0^{t_s} i \, dt$$

ただし， m [kg]は噴霧物の質量， i [A]は噴霧電流， t_s [s]は噴霧時間である。また，噴霧物が有する全電荷と噴霧電流に寄与する全電荷は差し引きゼロになるという基本的条件があるので，右辺にはマイナスの符号を付けている。

電荷密度は，現像液では値は -15～40 μ C/kg，洗浄液では E のみ+2.3 μ C/kg で他はほぼゼロ，浸透液では+8～17 μ C/kg 程度であり，絶対値の相対的な関係は噴霧電流（図 7）の場合と変わらない。これは，噴出量が同種液剤についてはほぼ同じであったためである。スプレー缶には噴射剤を含め約 300g が充填されているから，例えば，10 μ C/kg の電荷密度

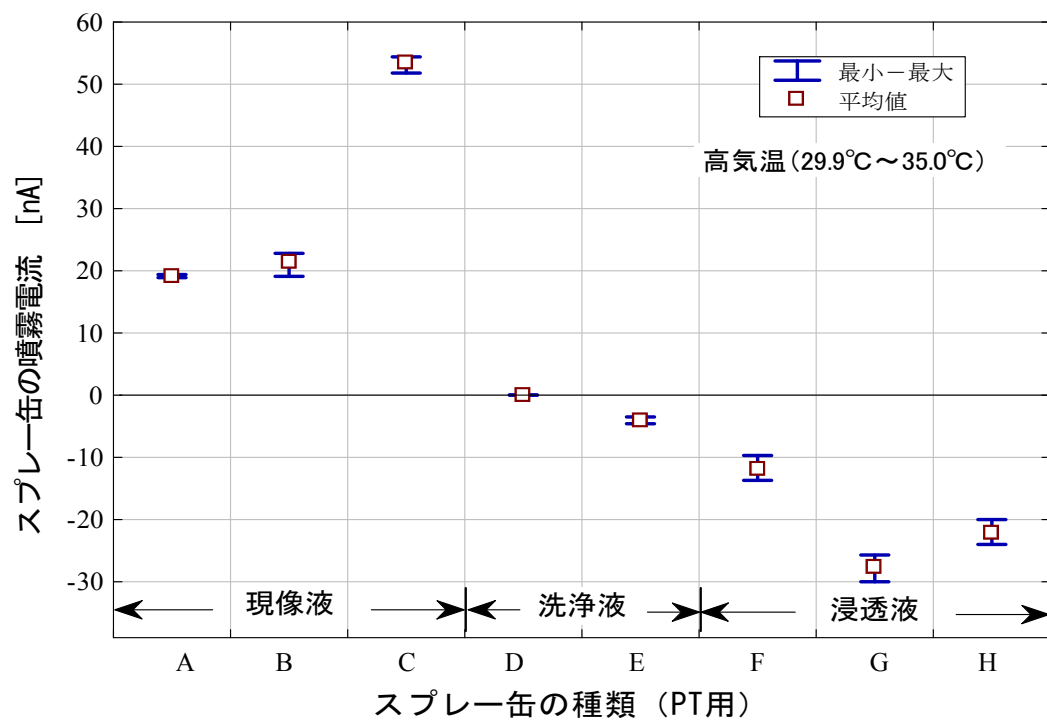


図 7 浸透探傷検査用スプレー缶の噴霧電流（高気温時）

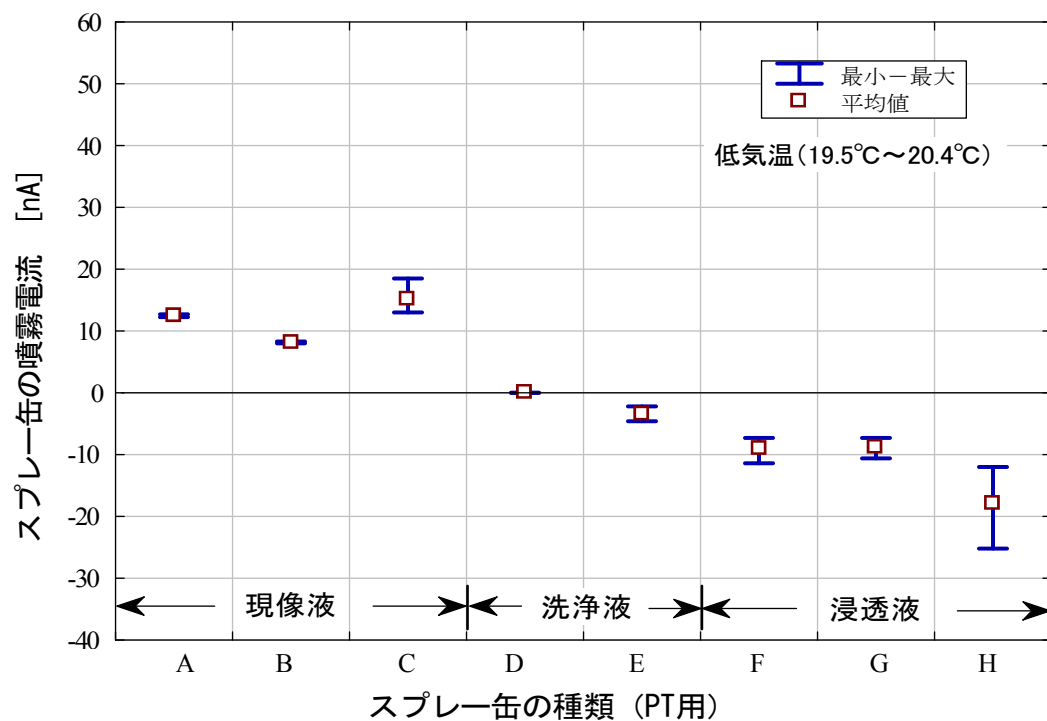


図 8 浸透探傷検査用スプレー缶の噴霧電流（低気温時）

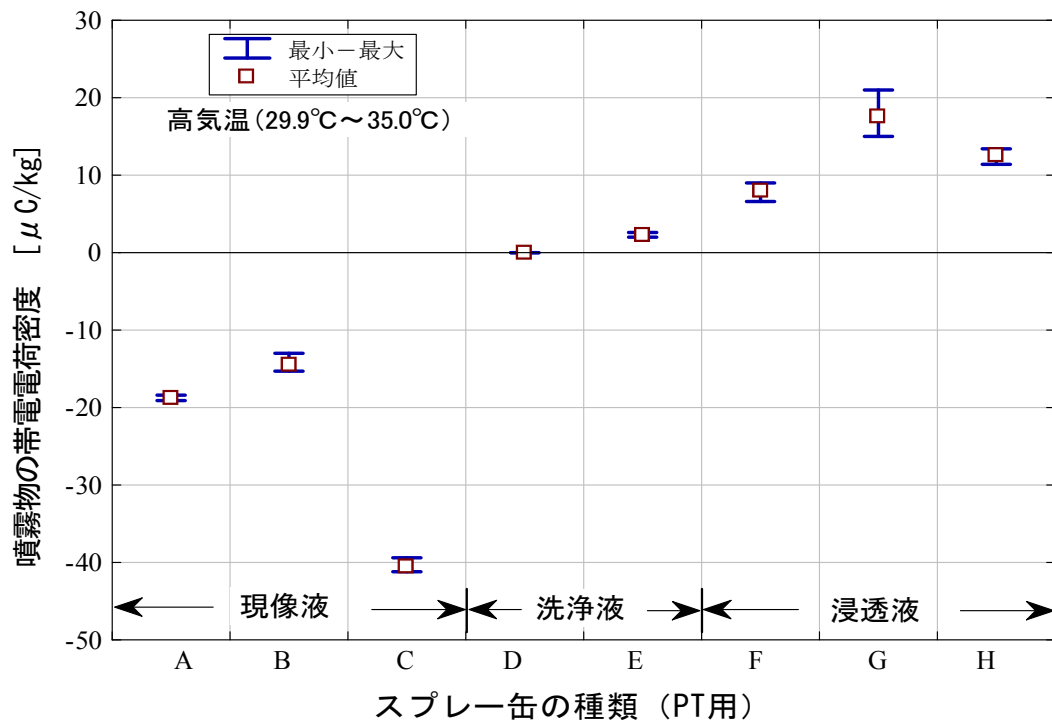


図9 浸透探傷検査用スプレー缶の噴霧物の電荷密度（高気温時）

であれば、全量噴射すると $3 \mu\text{C}$ の電荷が発生することになる。もし、この電荷がリークすることなく人体と同程度の 100 pF の静電容量を有する導体に蓄積すれば、その静電エネルギー ($1/2CV^2$) は 45 mJ となるから危険なレベルと考えなければならない。

なお、噴霧物に大量に含まれる噴射剤及び揮発性の高い溶剤類は噴霧後速やかに気化してしまうので、最終的に噴霧対象物体に固体または液体として付着し残存する成分がどの程度の電荷密度を有するかに関しては、現在のところ定量的な測定が困難である。

浸透探傷試験用以外のスプレー缶のうち、J（代替フロン HFC-134a 使用）及び潤滑油 2 種（K, L）について、噴霧電流を測定した結果及び噴霧物の電荷密度の計算結果を図10及び図11に示す。ただし J は直立させると内容物がガス状態で噴霧され、ほとんど帯電しなかったのので、倒立させて液化ガスを噴射させた。また、潤滑油の噴射剤は共に LPG であった。

噴霧電流が際立って大きいのは J である。このときの噴霧状態はガスの他に液体が固化した細かい微粒子（ドライアイス）を含んでいた。このドライアイスは、液化ガスの断熱膨張に伴う温度の急激な低下によって形成されるものである（この効果を利用して局所的な冷却の目的で使用されることもある。）。しかし、噴霧量が約 10 g/s （浸透探傷用の缶では約 $1 \sim 1.5 \text{ g/s}$ ）と大きいので、噴霧物の電荷密度は平均 $32 \mu\text{C/kg}$ と浸透探傷用の現像液及び浸透液と大差ない値となった。また、イメージインテンシファイヤ（光電子倍增管）による観測では、ドライアイス状にして噴霧している間ノズル近傍でコロナ放電が発生し、また、フィルム等の絶縁物に向かって噴霧させると、まれに絶縁物の表面で筋状の放電が発生した。このことは、ノズル内壁との衝突によるドライアイスの帯電が極めて大きいのでノズル先端に空気の絶縁破壊が生じるほどの高電界が形成されること（この放電より、発生した電荷の一部は中和される）、ならびに、衝突物に付着したドライアイスは速やかに気化し電荷を残すので、特に衝突物が絶縁物であると衝突面に局所的に高い電荷密度の領

域を作り、ついには放電を発生するレベルまでに達することを意味している。HFC-134a 自体は不活性ガスであるので可燃性はないが、他の可燃性物質が混在している中で使用すると着火源となる可能性がある。（過去に、炭酸ガス消火設備で噴射された CO₂ のドライアイスによる燃料タンクの爆発事例がある。[4]）

噴射剤のみ（特注品）の場合は、LPG では噴霧電流は測定限界以下の極めて小さな値であったが、DME では -16 nA 及び $+8.9 \mu\text{C/kg}$ と比較的大きな値が得られた。これは、LPG が非極性の飽和炭化水素であるに対し、DME は極性を有することによるものと考えられる。従って、DME を噴射剤とするものは原液の如何に関わらず帯電の危険性があるという認識を持つべきであろう。一方、潤滑油はいずれも比較的小さな帯電量であり、一般に噴霧時間も短いことから特に問題となるようなレベルには達しないと考えられる。

以上を総括すると、スプレー缶噴霧時の帯電現象に与える内容物の影響として、次のような傾向が見いだされる。

- (1) 極性溶剤（DME、エタノール等）を含む場合は、噴霧電流は負に、噴霧物は正に帯電しやすい。これは、極性分子がノズルとの界面で配向双極子を形成し、これにより、溶剤中に含まれる負イオンがトラップされるが、正イオンはフリーの状態で存在するため、溶剤とともに噴霧されると考えられる[4]。
- (2) 非極性溶剤（LPG、ヘプタン等飽和炭化水素）のみを含有する場合には、安全上問題ない程度（十数 pA）の帯電である。溶剤中にイオンをほとんど含まないために電気二重層の剥離（shearing）のみが帯電機構になっているものと考えられる。
- (3) 微粒子を含む場合、これの摩擦帯電によって支配的に大きな噴霧電流を生じることがある。（二酸化珪素及び炭酸塩の微粒子を含む現像液の場合には噴霧電流は正に、噴霧物は負に帯電したが、溶剤中のエタノールは正に帯電すると考えられるから、微粒子の実際の帯電量は見かけよりも大きいと考えられる。）
- (4) 噴霧時の断熱膨張による温度低下によって微粒子（ドライアイス）を形成する物質は、同微粒子とノズル壁面の衝突により極めて強力に帯電する。

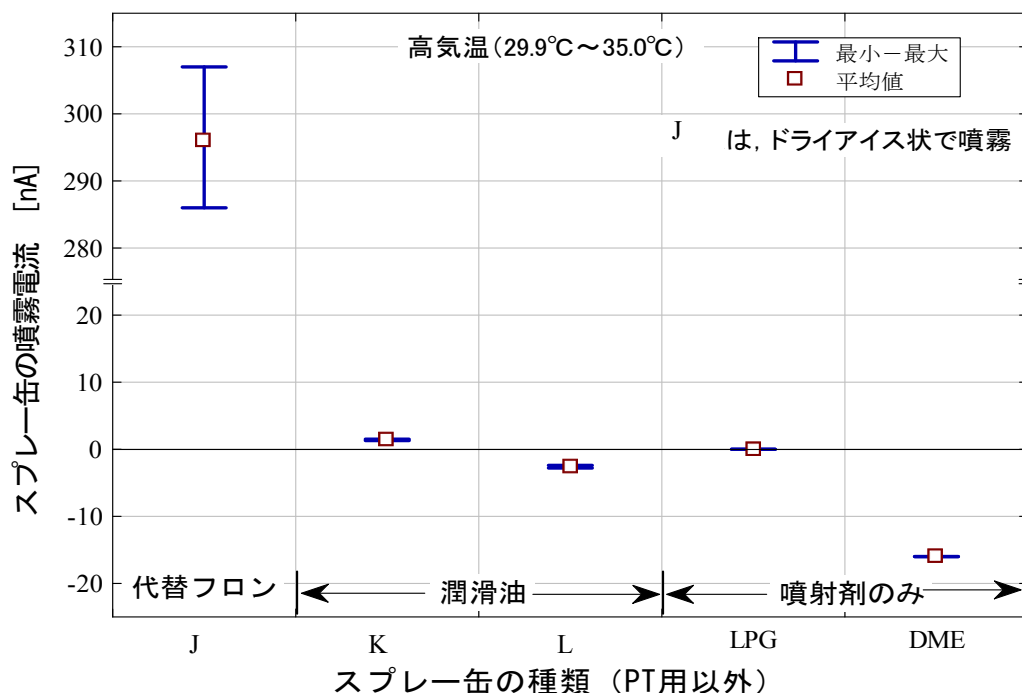


図10 スプレー缶の噴霧電流（PT用以外）（高温時）

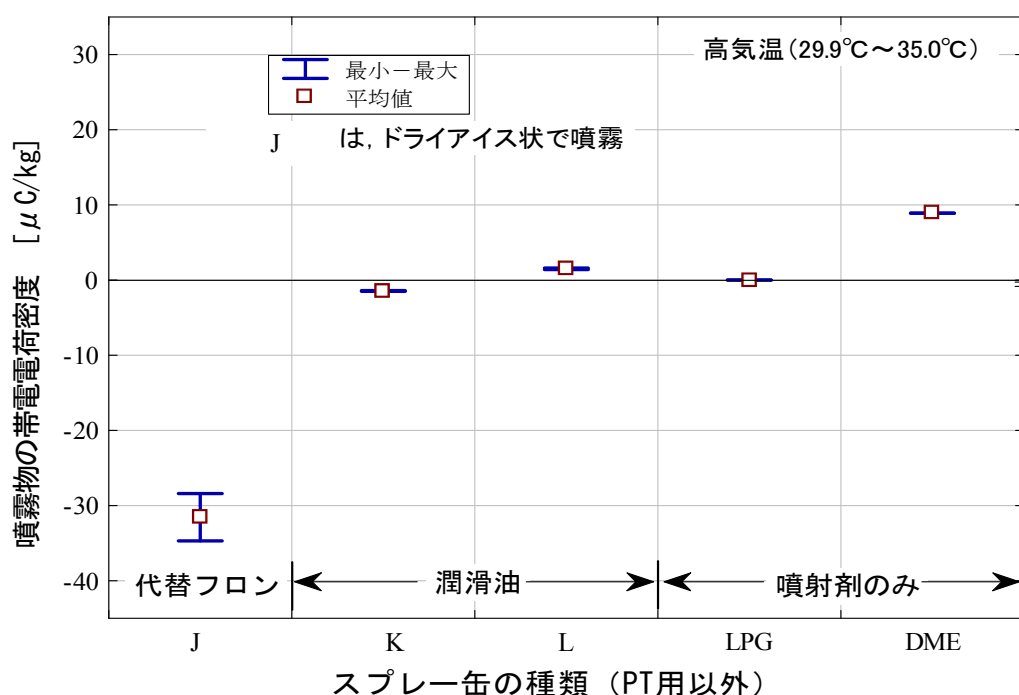


図11 スプレー缶の噴霧物の電荷密度（PT用以外）（高温時）

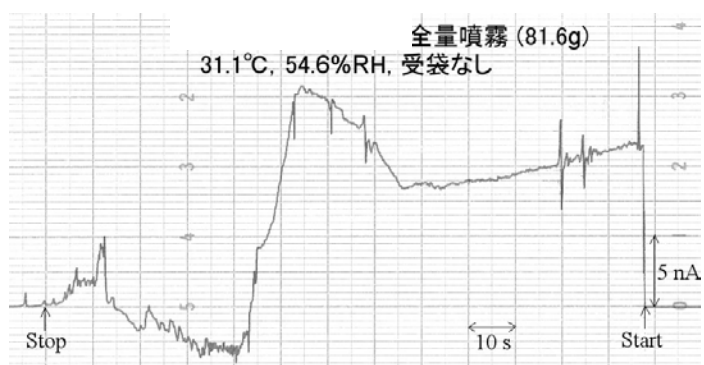
5.2.2 持続的噴霧における噴霧電流の変化傾向

実際の浸透探傷検査においては一回の噴霧時間は数秒から数十秒であるが、廃棄処分時には数分に及ぶことがある。また、そこで、スプレー缶の内容物が完全に放出されるまでの噴霧電流の変化を観測した。まず、現像液に関しては、図12(a)～(c)に示すように、3種類とも変動が大きいものであった。特にA及びBは後半において極性の反転を生じた。このような変動をもたらす要因としては、懸濁している無機微粒子の濃度及び濃度比が沈降等によって時間的に変化することが考えられる。また、後述するように溶剤の一つであるエタノールは無機微粒子と逆の極性に帯電するため、無機微粒子の濃度が小さくなると極性の反転が生じるものと考えられる。

一方、浸透液(H)及び洗浄液(E)については、図12(d)～(e)に示すように、噴霧初期にやや急激な電流の低下がみられるが、その後は緩やかに低下していき、極性の変化もなかった。これは、内容物が全て互いに溶解(dissolve)しているため、成分の濃度や濃度比が噴霧している間一定に保たれていたことが、現像液の場合のような急激な変動をしなかった理由と考えられる。また、徐々に低下していく理由としては、噴射剤の排出に伴って缶内部の気相部分が増加するので、圧力を維持するためには速やかに残存の噴射剤が気化しなければならないが、気化速度に若干の遅れがあるために内圧の低下を引き起こし、このために噴出速度の低下が起こったものと考えられる。このことは、5.2.1において10秒間の噴射実験を繰り返した際、約5分程度のインターバルでは毎回ほぼ同様の電流であったこと（インターバルの間に内圧が回復したと考えられる）、また、10 s, 20 s, および 60 s と噴霧時間を長くしたところ、その単位時間当たりの噴霧量がそれぞれ 0.985 g, 0.914 g, および 0.877 g と小さくなっていったことから裏付けられる（気温 27.1 °C, スプレー缶 A を使用）。

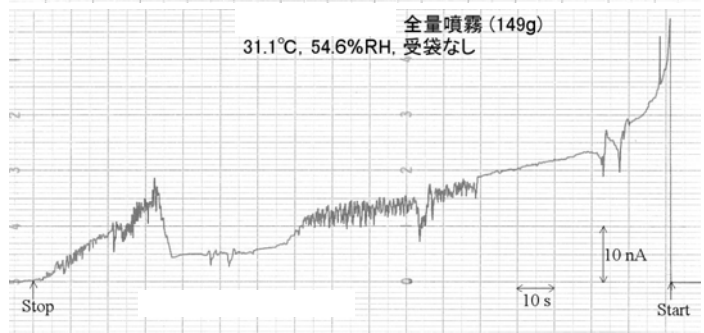
(a) A

現像液



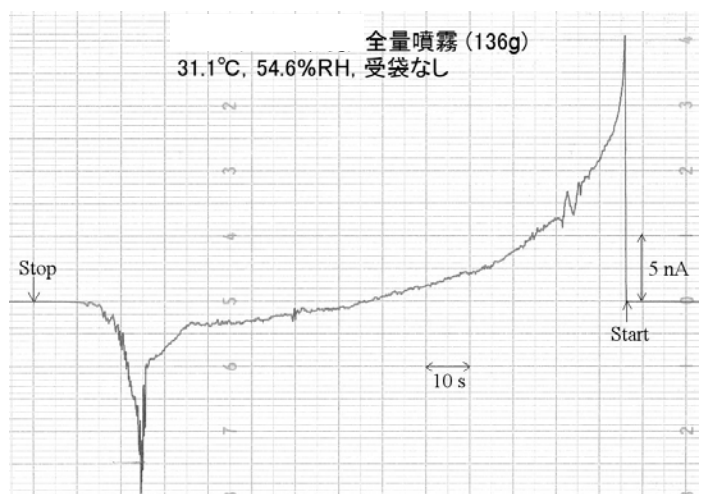
(b) C

現像液



(c) B

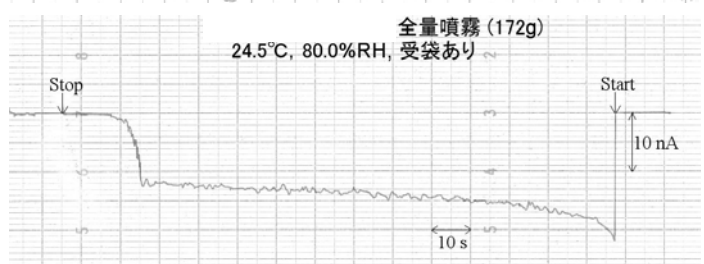
現像液



(d) H

浸透液

(浸透液による汚染防止のためポリ袋に向かって噴霧した。途中の細かい変化はこれによるもの。)



(e) E

洗浄液

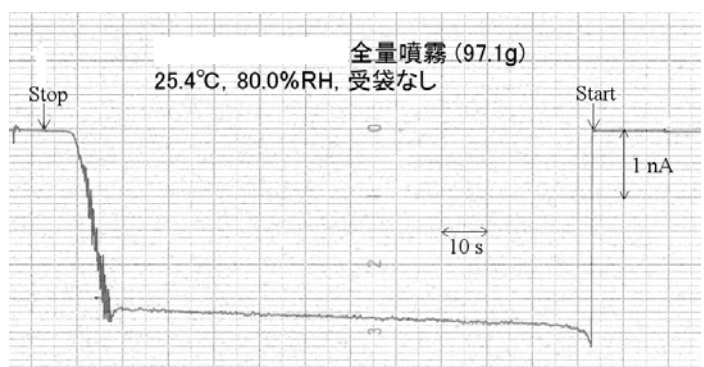


図12 持続的噴霧時の噴霧電流変化

5.2.3 スプレー缶の温度が帯電に与える影響

5.2.1 で述べたように、スプレー缶噴霧時の気温が帯電量にも大きく影響したことから、スプレー缶の温度が噴霧状態及び帯電量に与える影響を詳細に調査することとした。もちろん、現場作業を考慮すれば、スプレー缶の温度と気温は平衡状態にあることが望ましいが、実験設備の都合上、ほぼ一定の気温(18~22℃)においてスプレー缶の温度のみ5~30℃の範囲で調整した。スプレー缶の温度調節には冷凍庫及び電気ヒーターを用いた。所定の温度となったスプレー缶には断熱材(ウレタンシート)を巻いて保温し治具にセットした。実験対象のスプレー缶は各種の浸透探傷用のうち、帯電量が比較的大きかった A(現像液)、E(洗浄液)、G(浸透液)、並びに噴射剤(DME)のみのもの計4種類とした。

噴霧電流及び噴出量の測定結果を図13に示す。温度が上昇するにつれ噴出量も大きくなるが、帯電量の増加率は更に大きいものとなった。特に A(現像液)は5℃ではほとんど噴霧電流が発生しないのに対し、20℃を超えるあたりから大きな増加率を示している。これは、エタノールと微粉末の帯電極性が反対であるので、5℃付近では相殺し合ってゼロであるが、温度上昇とともに微粉末の電荷が急増することが原因と考えられる。また、図14に示すように、噴霧物の電荷密度も温度とともに上昇する傾向が全てのスプレー缶において見られた。とりわけ、Aは温度依存性が顕著であった。更に、図15(a)及び(b)の写真に示すように、温度によって噴霧状態が明瞭に変化することが確認された。すなわち、高温時に比べ、低温時には噴射後の霧化が緩慢であることがわかる。

スプレー缶の温度が内部に与える物理的影響としては、噴射ガスの気相での圧力変化が挙げられる。インターネットで入手可能な公開資料によれば、噴射用ガスの温度と飽和蒸気圧には図16に示すような関係がある。例えば、DMEは5℃では0.22 MPaであるが30℃になると0.59 MPaと約3倍の圧力となる。このような噴射圧力の変化が噴霧量と直接関係していると考えられる。

スプレー缶における帯電現象が主としてノズル内部で生じると仮定すれば、温度の上昇によってノズル内での流速が増加し、同時に気化が活発になるために内容物がノズル壁面により高い圧力で衝突することとなり、これらの相乗的な効果で帯電量が増加するものと推測できる。特に、現像剤には固体の微粒子が含まれるため、圧力上昇の影響を顕著に受けるようである。

なお、前述のように、本件災害発生当時の現場の気温(室温)は約29℃と体感的に高温であったから、スプレー缶が帯電しやすい温度条件にあったと推定される。

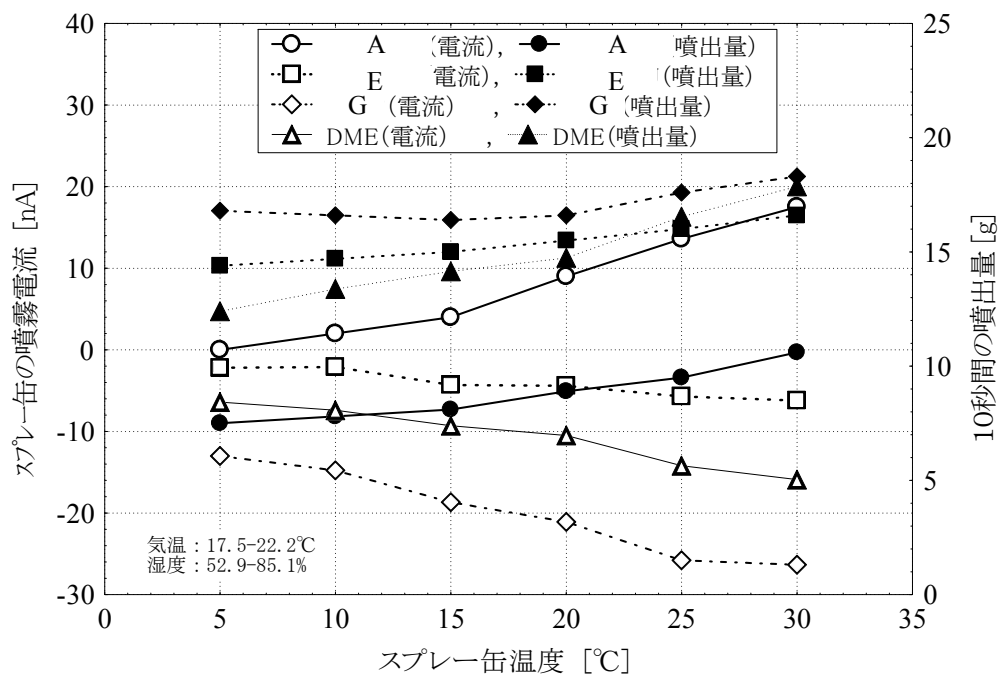


図13 スプレー缶温度の影響（噴霧電流及び噴出量）

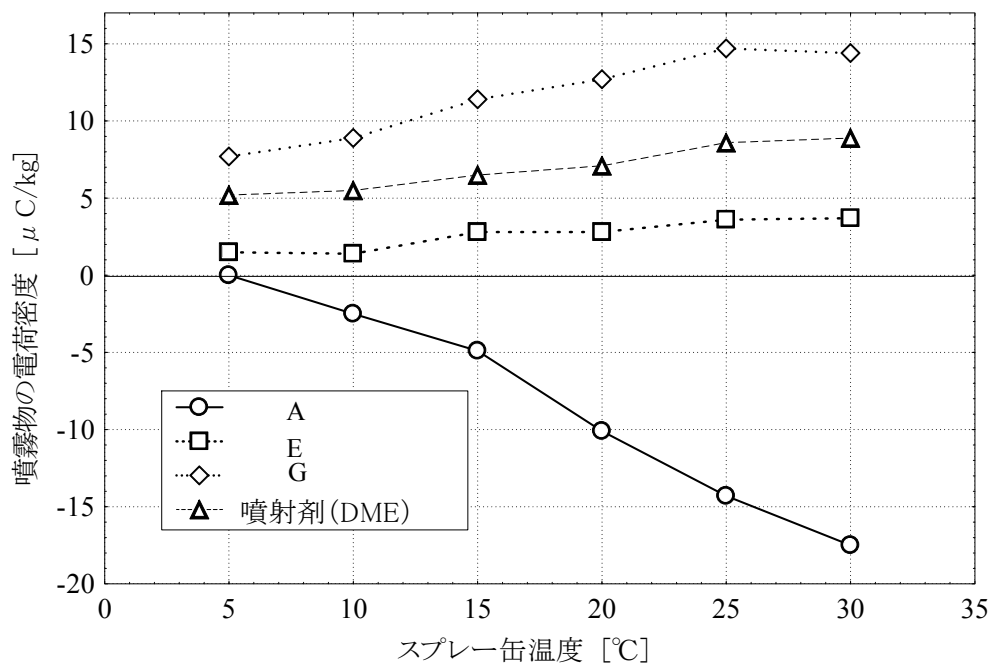
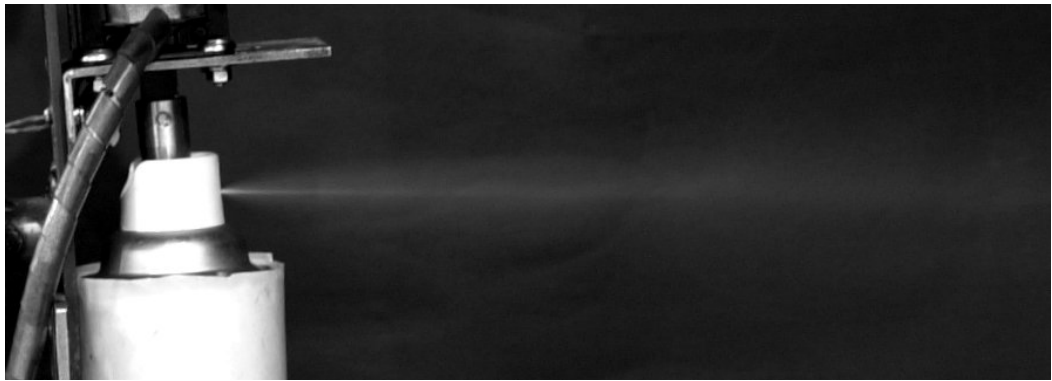
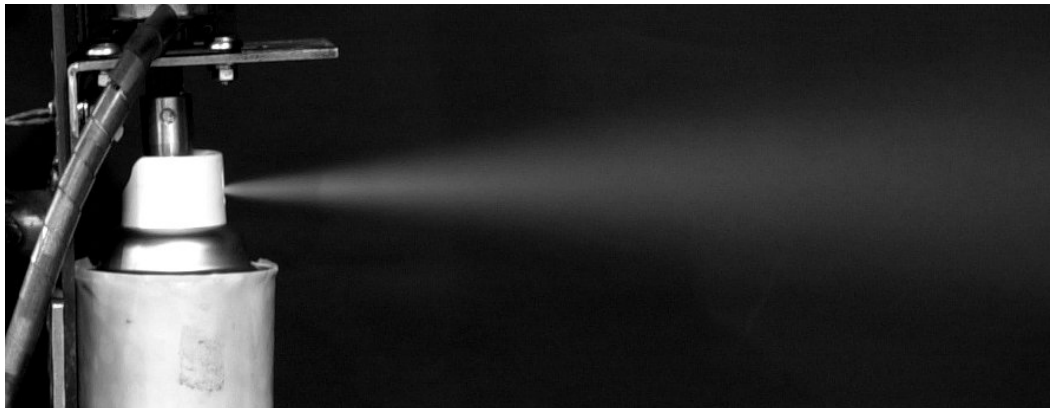


図14 スプレー缶温度の影響（噴霧物の電荷密度）



(a) スプレー缶温度 5℃ (気温 22.5℃ ・湿度 52.9%)



(b) スプレー缶温度 30℃ (気温 22.5℃ ・湿度 52.9%)

図15 スプレー缶温度の影響（噴射状態，現像液(A)）

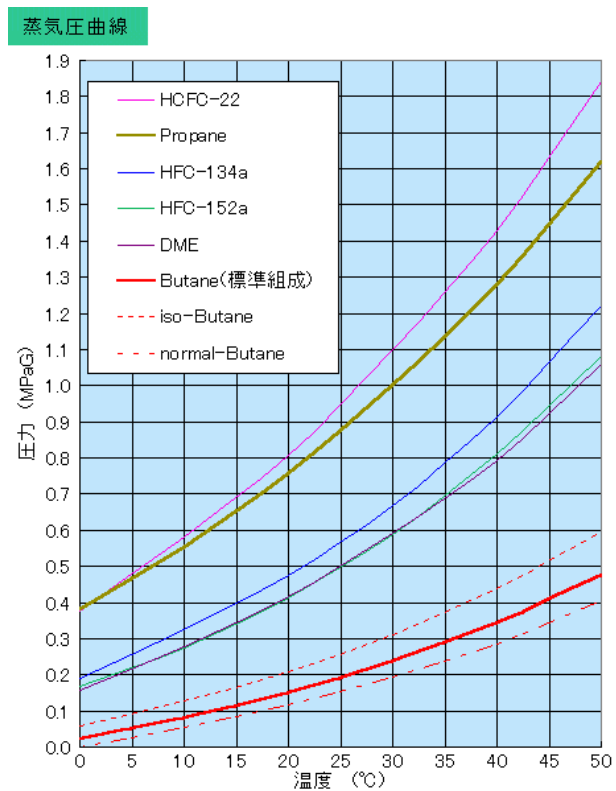


図16 スプレー缶用噴射剤の蒸気圧と温度の関係

5.2.4 ノズルの影響に関する一実験

本実験で使用した浸透探傷検査用スプレー缶は全て同じ材質及び構造を有しており、当然、ノズルボタン（ノズル及び押下用ボタンユニットの通称）も全く同じタイプのものであった。噴霧時の帯電現象ではノズルの材質及び構造が支配的な役割を有することから、将来の帯電防止対策の可能性を探るべく、数種のノズルボタンを用いて帯電性を比較することとした。本実験で用いたノズルボタンは、表 6 に示すような特徴を有するものであり、外見は図 17 に示す通りである。これらは材料及び孔径を考慮して便宜上、金属スモールボア及び同ラージボア並びに樹脂スモールボア及び同ラージボアと呼ぶことにする。スプレー缶サンプルとして、浸透探傷用の中で比較的帯電量の大きい現像液(C)及び浸透液(H)を用いた。

噴霧電流の測定結果（3回の平均値）を図 18 に示す。一般的傾向として、同様の材質であればノズル孔径が大きい方が帯電量が小さい（金属の場合 1/4～1/5 倍）という傾向が得られた。これはノズルの断面積が孔径の 2 乗に比例して大きくなるために、内容物の単位質量当たりのノズル壁面との接触面積の減少並びに流速の低下が起こったためと考えられる。また、樹脂ノズルについては、浸透液の場合に、スモールボアとラージボアでは大きさのみならず極性が異なるという結果が得られたが、これは原料のポリエチレンに添加された着色用染料の影響を受けているものと考えられる。本実験では金属製の方が樹脂製よりも孔径が大きいから、全く形状的な条件が等しい場合に金属と樹脂のどちらを用いれば帯電量が小さくなるかは直ちには決められない。しかし、浸透探傷用として現状通り金属製ノズルが不可欠とすれば、その孔径を少し大きくすることにより大幅に帯電量を減少させることが可能であるから、対策の方向性として考慮に値するであろう。一方で、表 7 に示すように、孔径が大きくなれば噴出量もやや増加するから、噴出量を変化させない様にするためにはノズルボタン内部の構造を変える等の追加的措置を要するであろう。

表 6 実験に用いたノズルボタンの特徴

名 称	ノズル部		ボタン部	備 考
	孔径 [mm]	材質	材質	
金属スモールボア	0.6	真鍮 (Ni 鍍金)	PE (白)	
金属ラージボア	0.8	真鍮 (Ni 鍍金)	PE (白)	
樹脂スモールボア	0.4	PE (赤)	PE (赤)	
樹脂ラージボア	0.46	PE (黄)	PE (白)	

- (注) 1. PE=低密度ポリエチレン。PE (色) は着色を示す。
 2. 樹脂ラージボアにはエクステンションチューブ (PP 製) が付属していたが、本実験では取り外した。



図17 ノズルボタンの外観

(左から、金属スモールボア、同ラージボア、樹脂スモールボア、同ラージボア)

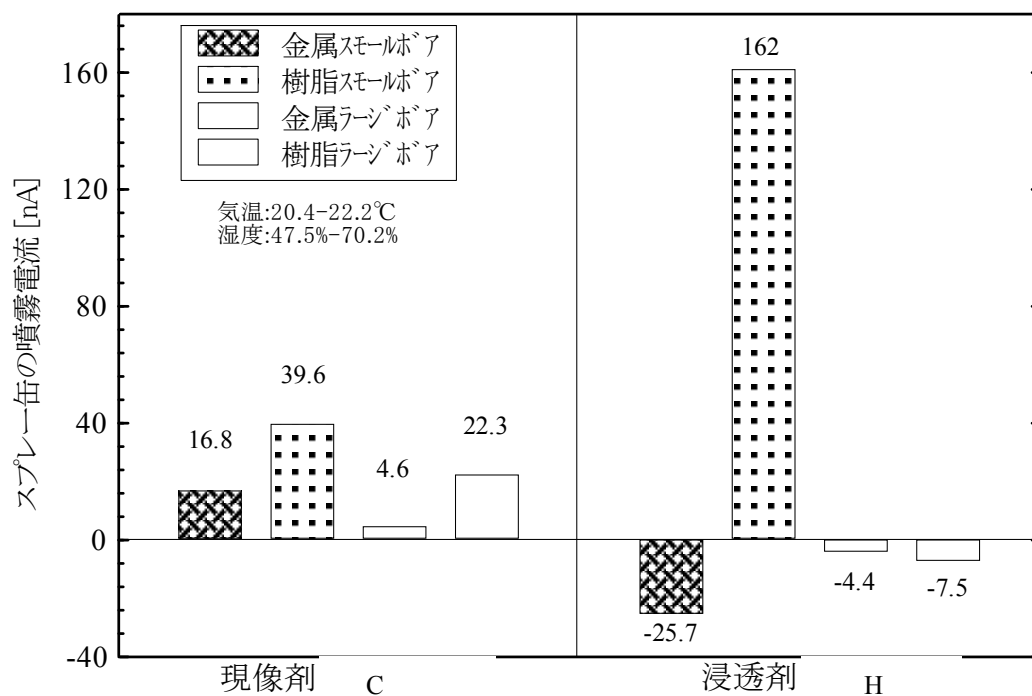


図18 スプレー缶噴霧ノズル材質及び孔径の影響

表7 ノズル構造と噴射量の関係 (噴射10秒間平均値)

スプレー缶	金 属 スモールボア	樹 脂 スモールボア	金 属 ラージボア	樹 脂 ラージボア
現 像 液 (C)	12.6 g	7.95 g	14.6 g	9.19 g
浸 透 液 (H)	17.7 g	10.5 g	19.9 g	13.3 g

6. 作業工程における帯電物と帯電要因

5.においてスプレー缶噴霧時に、缶の種類及び環境条件によっては大きな噴霧電流が発生することを実験的に確認した。その他にも、災害発生当時の作業者の着衣や床の状態等からみて帯電要因となるものはいくつか見受けられた。そこでこれらの帯電要因について実験的に調査を行い、その危険性を評価することとした。

6.1 スプレー缶噴霧時の人体帯電

噴霧電流を発生中のスプレー缶は、図19の等価回路のように、高い内部インピーダンスを有する電流源に近似できると考えられるから、電流はそれを操作している人体へ容易に流入し、もし、人体が絶縁されていればその電位を上昇させると見込まれた。そこで、図20に示すように、災害現場と同様に、床上にゴムマット及び難燃シートを敷き、被験者にゴム長靴及び綿手袋とゴム手袋を重ねて着用させてスプレー缶を噴霧させ、その際の電位上昇を測定した。本実験では3社の現像液を用いた。各現像液につき、噴射時間等を変化させ数回ずつ実験を行った。電位変化のチャートを図21(a)～(i)に示す。一般的傾向としては、噴霧開始とともに電位は徐々に増加し、50～100秒程度でピークに達し、以後徐々に減少に転ずることが多い。ピーク値はばらつきが多いが、C及びBでは+4～5kV程度、Aでは+10kV程度に達することがあった。Bの場合はピーク値が他のものよりも小さく、かつ、途中から極性が反転する場合もあった。このような電位変化の傾向は、既に図12に示したような各スプレー缶の噴霧電流の変化パターンにほぼ沿ったものであった。例えば、A（図12(a)）は噴霧電流は時間とともに大幅に減少することなく、ときには上昇しながら推移するので、人体電位は初期段階では一貫して上昇するが、残量が少なくなると急激に電流が低下し、ついには逆極性になるので、電位は飽和及び減少傾向を示す。また、B（図12(c)）は初期の噴霧電流は大きいものの、急激に減少し、やがて逆極性に転じ電流を増加させるので、人体に流入する電荷は相殺され、電位上昇を抑制することとなる。ただし、スプレー缶内部の無機微粒子の濃度や混合比に依存して噴霧電流は大きく変化するから、一般的に電位変化または最大値を予測することは困難である。しかしながら、安全上重要な点は、いずれの現像液でも危険なレベルまで人体電位を上昇させる可能性があるということである。例えば、本実験での被験者の静電容量は105 pFであったから、3 kVでは0.47 mJ、5 kVでは1.3 mJ、そして10 kVでは5.3 mJの静電エネルギーが人体に蓄積することになる。もし、人体がこのような状態にあって何らかの接地体に接近すれば静電エネルギーに近いレベルの放電が発生することになる。スプレー缶に含まれる可燃性物質の最小着火エネルギーは表3に示すように0.3 mJ未満であるから、適当な濃度の混合気が形成されているならば、3 kV程度以上に帯電した人体と接地体との間の放電によって引火・爆発する可能性がある。

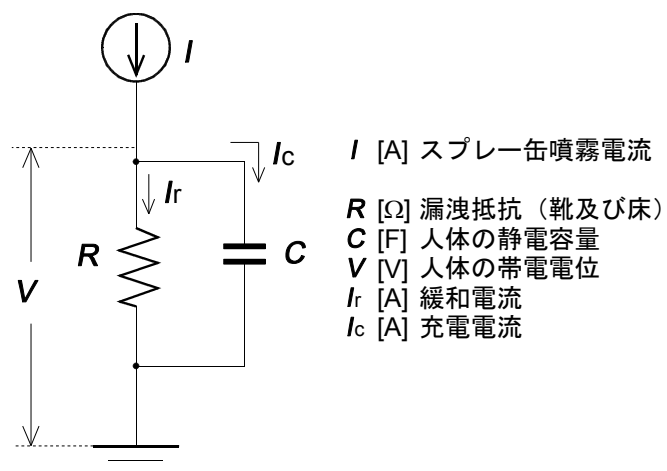


図19 スプレー缶噴霧による人体帯電の等価回路

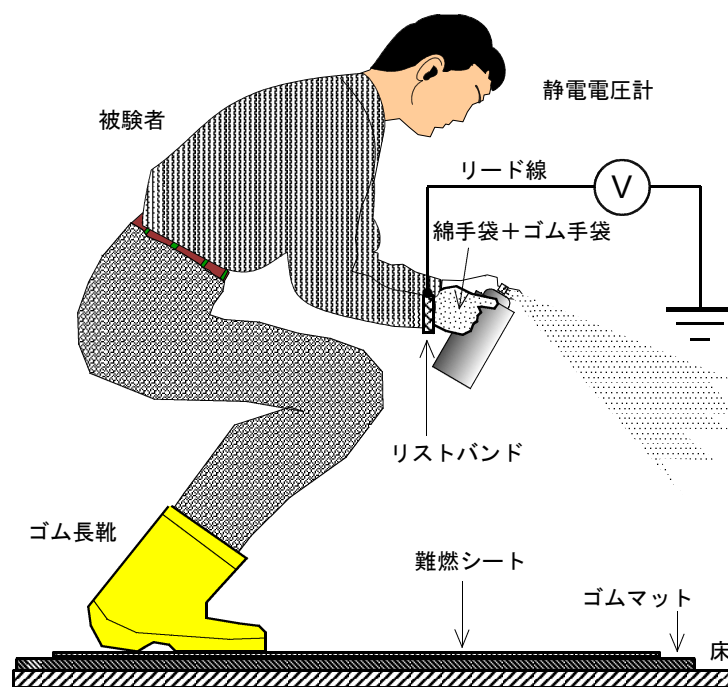
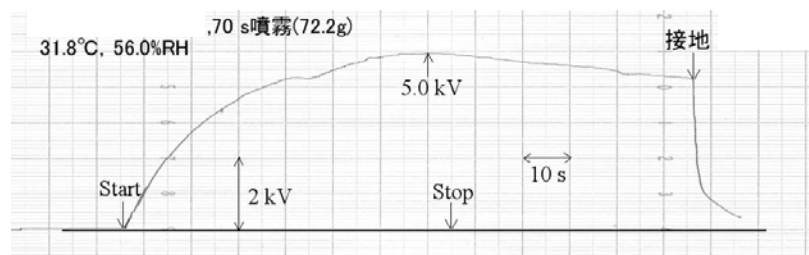
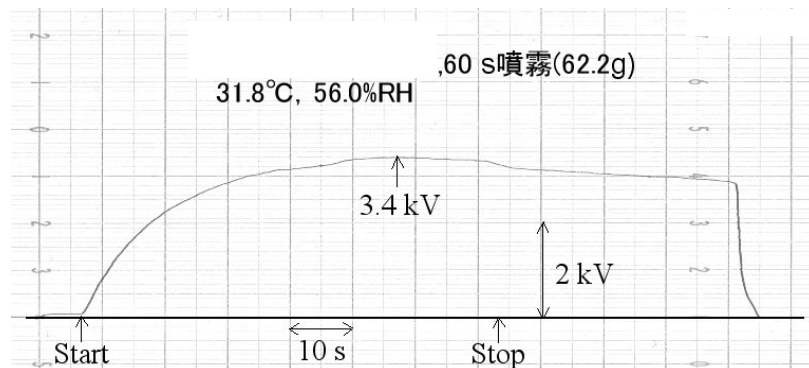


図20 スプレー缶噴霧による人体帯電の実験方法

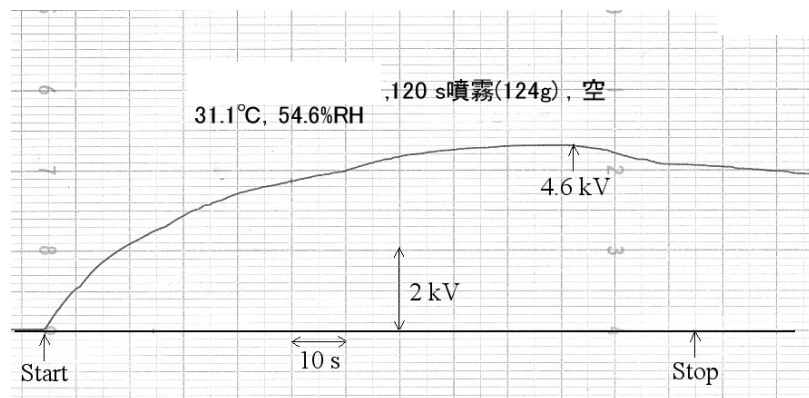
(a)
現象液 (C)



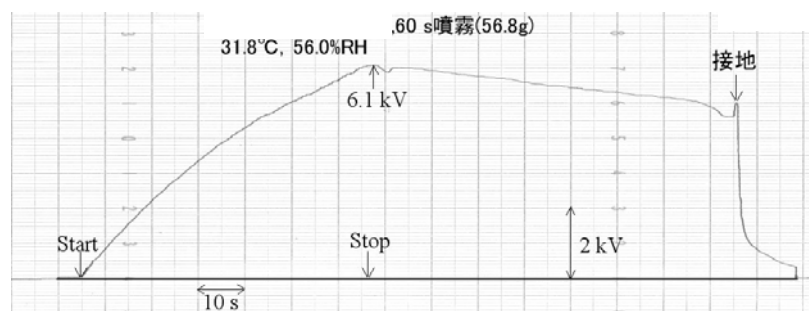
(b)
現象液 (C)



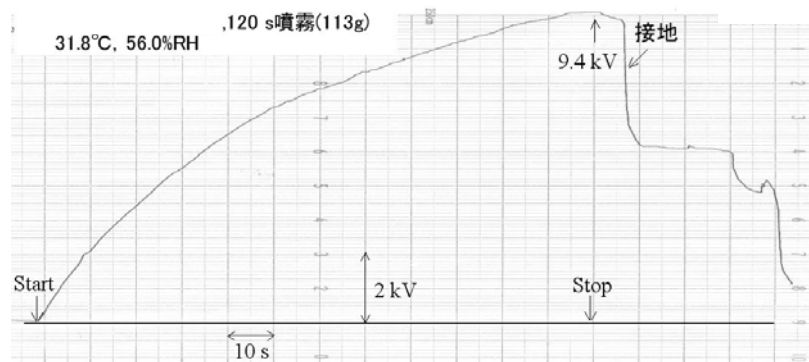
(c)
現象液 (A)



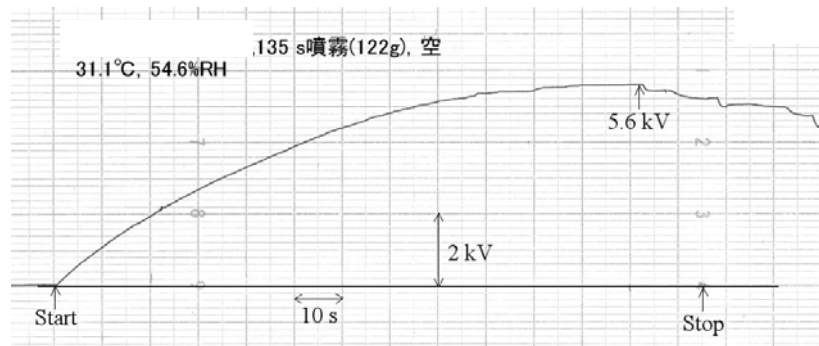
(d)
現象液 (A)



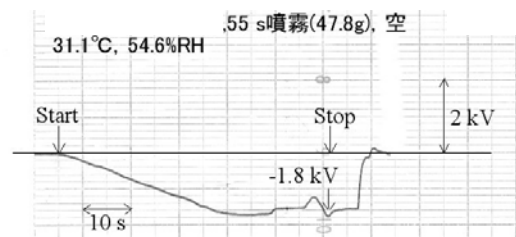
(e)
現象液 (A)



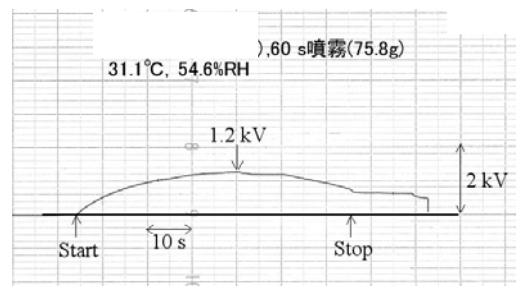
(f)
現像液 (A)



(g)
現像液 (B)



(h)
現像液 (B)



(i)
現像液 (B)

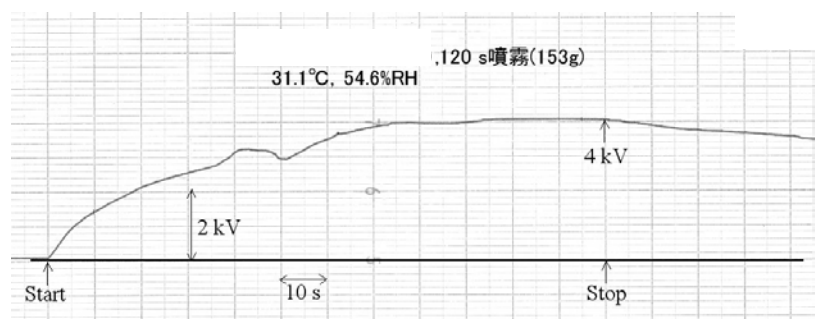


図21 スプレー缶噴霧中の人体帯電の変化

6.2 スプレー缶噴霧時のポリ袋の帯電

災害発生時，被災者の一人はスプレー缶をポリ袋内に噴霧していたことから，図22に示すような実験装置を用いて，現像液缶(A)を120秒間噴射させ，ポリ袋の電位変化を測定した。測定結果を図23に示す。これによれば，予想に反して，約70秒後に最大 -4 kV 程度まで達した後，徐々に減少していった。これは，現像液が導電性のあるエタノール（導電率文献値 $1.35 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ ）を含有するために，電荷がポリ袋の内面を伝って大地へ漏洩しているためと考えられる。更に，別途，床及び人体を災害時と同条件にして被験者がスプレー缶をポリ袋内部へ向かって噴射した場合もピーク電位は約 -3 kV 程度であり，ピーク後は徐々に減少する傾向が得られた。いずれも実験時の気温は約 21°C であったから噴霧電流が比較的小さく，そのためにピーク電位も危険レベルとは言い難い程度であったが，災害発生時は気温が約 29°C であったので噴霧電流はかなり大きく，また，エタノールも蒸発しやすいため導電性も小さかったと考えられるから，ポリ袋は電位もいくぶん高かった可能性がある。

さて，着火原因について考察してみる。一般に絶縁物が帯電してもそこで発生するブラシ放電のエネルギーは帯電した金属からの火花放電と比較してかなり小さいため着火性が低い。しかし，それでも帯電電位が極めて高くなると着火確率も高くなるので，水素等のごく一部の鋭感な物質を除き，一般の可燃性ガス・蒸気の着火防止のためには帯電電位を 5 kV 以下に管理するように推奨されている[2]。一方で，実際に絶縁物と接地金属球の間のブラシ放電でプロパン（最小着火エネルギー 0.25 mJ ）に着火するためには絶縁物が最低でも 30 kV に帯電する必要があったというデータがある[5]。本実験結果からみて，スプレー缶の噴霧等によってポリ袋（絶縁物）が 5 kV 以上に帯電した可能性はあるが， 30 kV 程度までに達することは極めて困難と考えられるから，ポリ袋と人体等の導体との間のブラシ放電が発生したとしても着火源となった可能性は極めて低いと考えられる。

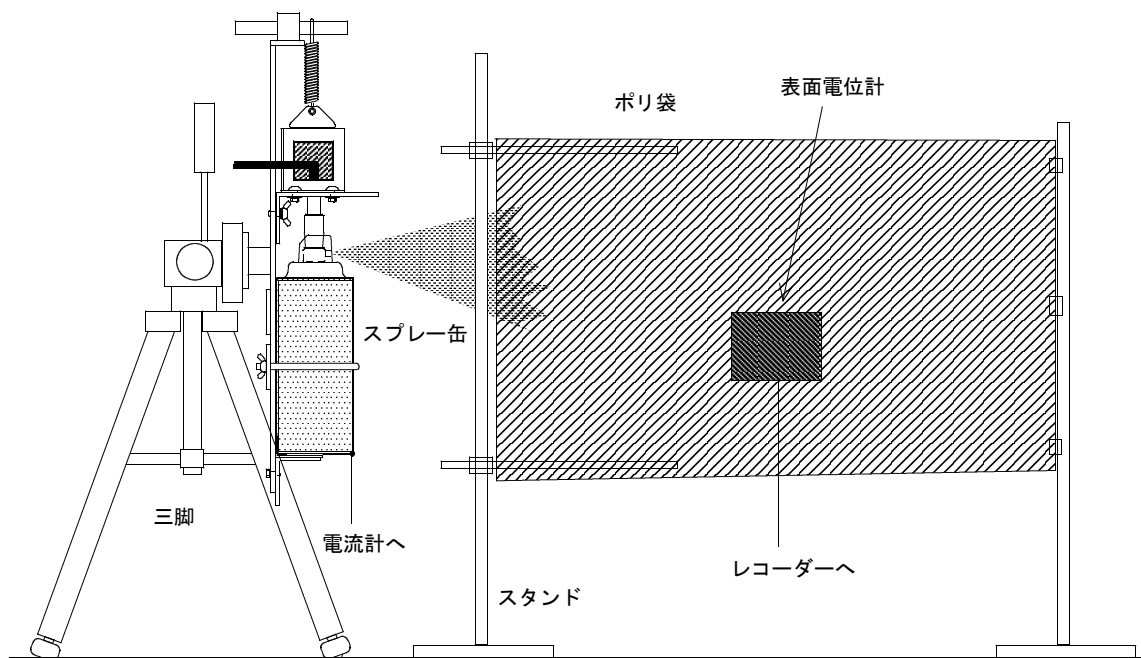


図22 噴霧物によるポリ袋の帯電の実験装置

21.0°C, 70.0%RH ,120 s噴霧(98.8g)

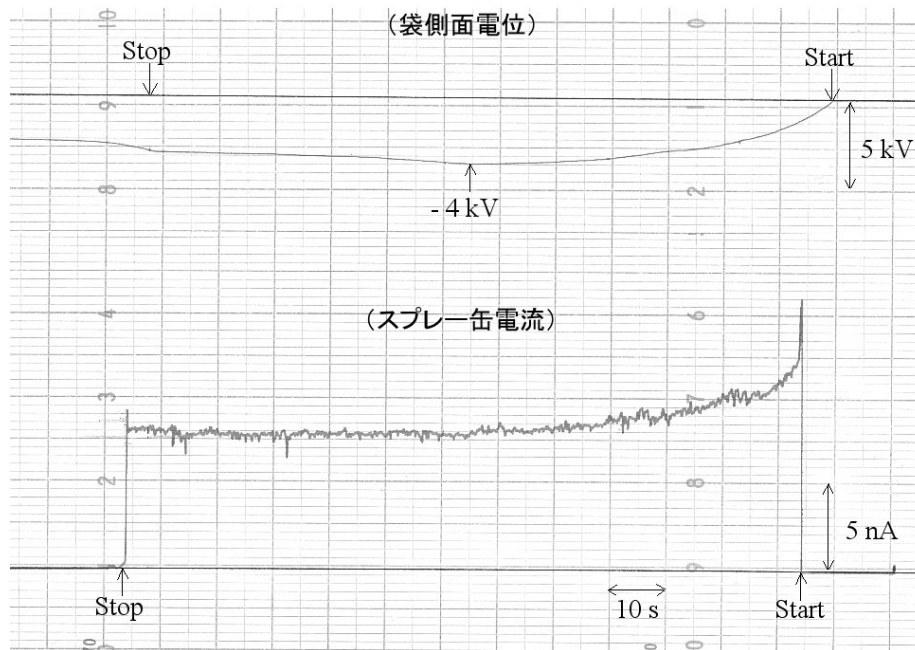


図23 ポリ袋側面の電位と噴霧電流の変化

6.3 帯電したポリ袋による人体への静電誘導

災害現場の条件においては，人体は絶縁状態にあったと考えてよいから，帯電物体に接近すれば静電誘導によって電位が上昇する。6.2の実験結果によれば，スプレー缶の噴霧に伴ってポリ袋は帯電するから，作業員が帯電したポリ袋に接近した場合には人体電位が上昇する可能性がある。これを定量的に知るために，床にゴムマット及び難燃シートを敷き，ポリ袋を帯電させることとした。恒温恒湿室内での実験であったので，万一の爆発，あるいは実験者の中毒等を防止するために代替フロン(J)のスプレー缶をドライアイス状でポリ袋内へ4秒間噴射し，帯電させた。これは，現像液缶を約1分間噴霧させた場合の発生電荷量に相当する。噴霧後は，ポリ袋の電位約-8kV（袋の中央部で測定）となり，その電位は実験中ほぼ一定に維持されていた。このポリ袋に対して様々な形で接近した場合の人体電位を図24に示す。

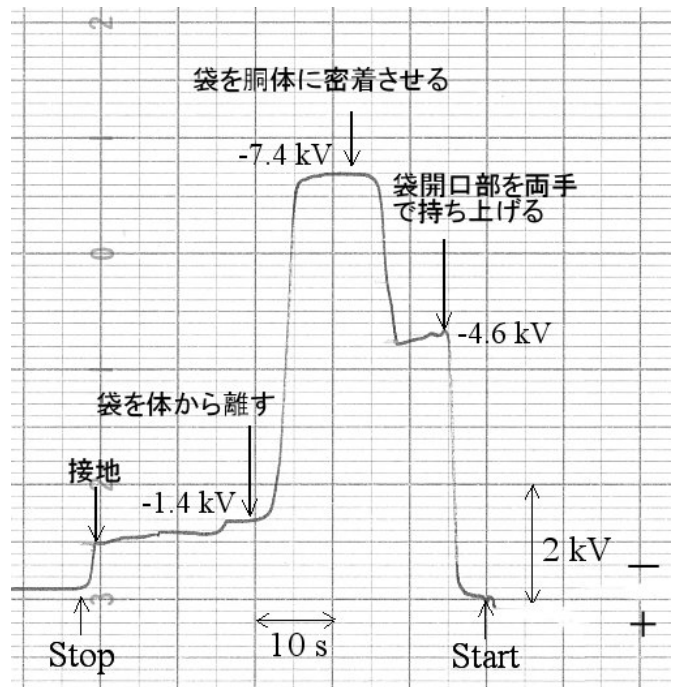


図24 帯電したポリ袋による人体への静電誘導
(ポリ袋の帯電電位-8kV)

まず、帯電したポリ袋を手にするだけで約 5kV に上昇した。次に、体に密着させると 7kV を超えた。そして体から離しても、わずかであるが電位が観測された。これは、放電または導通によってポリ袋から人体へ電荷が移動したものと考えられる。

以上のように、ポリ袋の電位と人体との距離次第では静電誘導によって人体は危険なレベルに帯電する可能性がある。

ただし、スプレー缶を噴霧中は、スプレー缶の噴霧電流による電位変化と袋による静電誘導による電位変化は互いに極性が逆であるので相殺しあう関係となり、人体電位の上昇が幾分かは抑えられると考えられる。

6.4 歩行による人体の帯電

床及び履物を災害現場と同じ条件として、図 25 に示す方法で歩行による人体帯電を測定した。比較のため床に敷くシートの条件を変えるとともに、ゴム長靴に加え静電靴及び合成ゴム底のスニーカーも使用した。歩行時間は 1 分間とし、その間の電位変化を記録するとともに、ピーク値を読み取った。その結果を図 26 及び表 7 に示す。結果的にはゴムマットと難燃シートを敷いた床上をゴム長靴で歩行しても、たかだか -200V 程度の電位にしか達しなかった。この値は放電を引き起こすようなレベルではない。したがって、歩行による帯電は本件災害の原因とはなり難いと考えられる。むしろ、静電靴を着用した場合の方が高電位となることから、静電気対策上はこのようなシート類を用いるのは不適切であると結論できる。

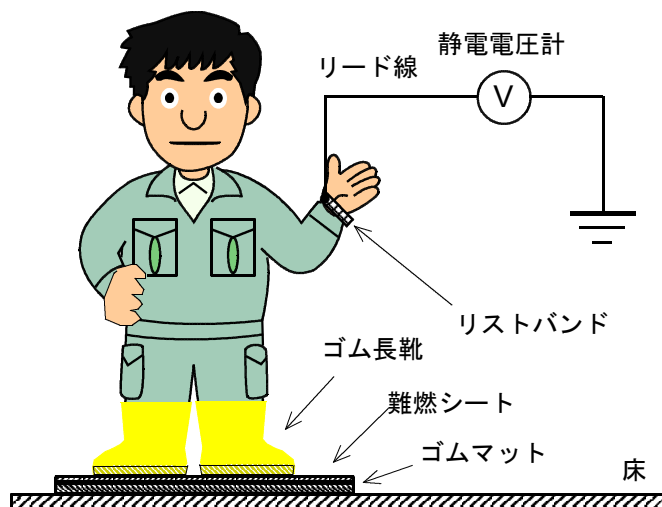


図 25 歩行による人体帯電の実験装置

表 7 作業員の歩行による帯電電位（飽和値）

（恒温恒湿室内 22.8℃, 37.6%RH）

履き物 床敷物	ゴム底長靴	静電靴	スニーカー
難燃シート	-0.60 kV	-0.40 kV	-2.5 kV
ゴムマット	+0.50 kV	+0.55 kV	+2.0 kV
ゴムマット＋難燃シート	-0.20 kV	-0.35 kV	-1.4 kV

注 1：網掛け部分が被災時の組み合わせ。注 2：実験室の床材はリノリウム。

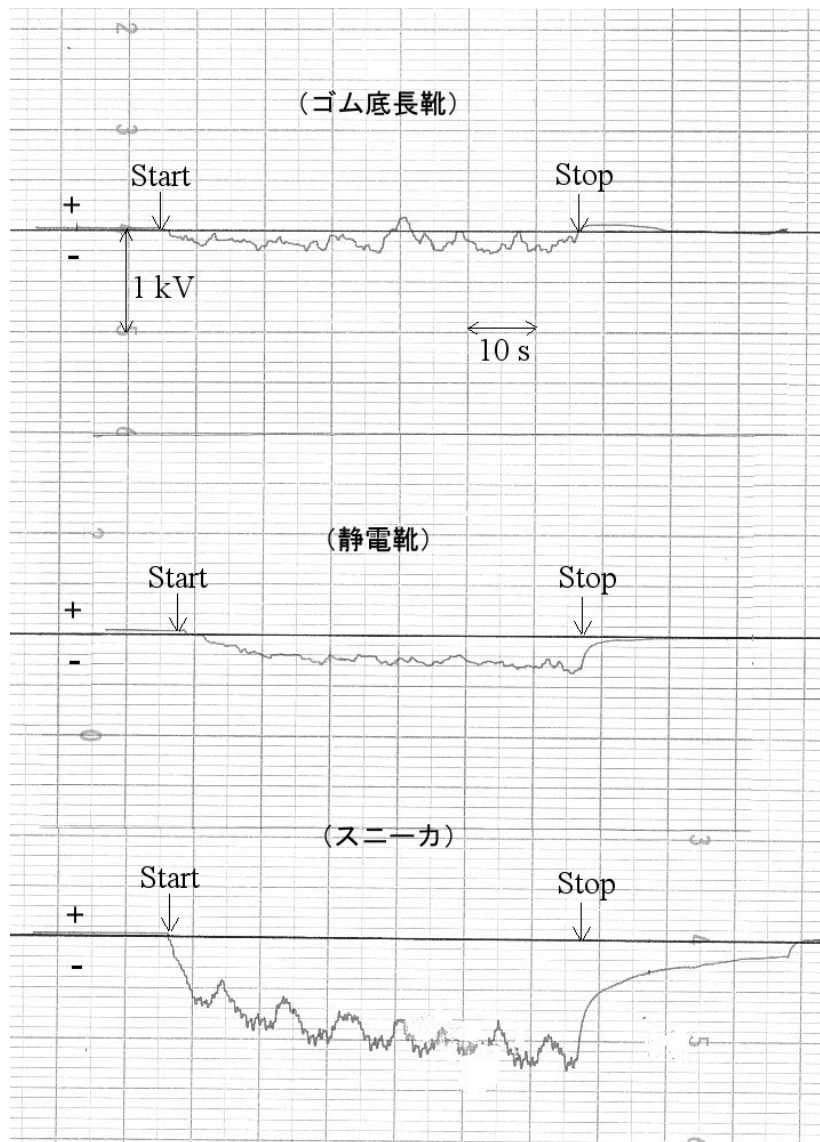


図26 歩行時の人体帯電電位の変化
(床：ゴムシート＋難燃シート)

7. 着火性放電の発生機構の推定

作業エリアは周囲をフェンスで囲まれていたから風通しが悪く、したがって、空気より重い噴射ガス及び溶剤の蒸気はポリ袋内及び床面近傍に滞留して可燃性雰囲気を形成していたと推測できる。一方、スプレー缶の噴霧または静電誘導により作業員の電位が非常に高くなり得ることが実験的に明らかとなった。しかし、着火が起こるためには、可燃性雰囲気の中で十分なエネルギーを持った放電が発生しなければならない。最も確実なのは接地された導電性物体に接近することであるが、現場の状況からみて、このような物体は被災者の近傍にはないように見受けられる。しかし、接地されていなくても導体であれば、多少エネルギーは低下するが、着火性の放電が発生することは可能と考えられる。災害現場でこのような導体として最もあり得るのはスプレー缶である。つまり、床上に置かれていたスプレー缶と人体との間で放電が発生した可能性はあると考えられる。

更に、帯電した人体と噴霧液（エタノール等の導電性の高い物質を含む場合）が付着したポリ袋の内面との間で着火性放電が発生する可能性が考えられたため種々の実験を行っ

たが，本災害を模擬した実験条件においては，発生した放電は微弱であり，着火性があるとの確証は得られなかった。したがって，現時点では，着火源となった可能性は低いと考えられる。

7.1 放電エネルギーの推定

帯電した導体（人体）から絶縁された導体（人体またはスプレー缶）から火花放電が発生した場合の放電エネルギーを概算する。ここでは図27(a)及び(b)のような2種類のケースを考える。一つは，作業員がスプレー缶を手を持ったまま，そのスプレー缶を床に置かれた別のスプレー缶へ接近させる場合。もう一方は，スプレー缶を放り投げて別のスプレー缶に当てる場合である。図27(a)の右上に示すような単純化した等価回路を用いて計算すると放電エネルギーの最大値を得ることができる。また，人体及びスプレー缶の静電容量は図28に示す方法で測定した。

(1) 人体が持つスプレー缶と別のスプレー缶の間の放電

この場合の放電エネルギー W は以下のように表すことができる。

$$W = \frac{1}{2} C_h V^2 \left(1 - \frac{C_h}{C_h + C_c} \right)$$

ただし， V [V]は人体の帯電電位， C_h [F]は人体の静電容量， C_c [F]はスプレー缶の静電容量である。

実測の結果， $C_h=105\text{pF}$ ， $C_c=35\text{pF}$ （横転）であったから，ある人体電位における放電エネルギーは表8の第3カラムの通りとなる。この値は，人体の静電エネルギーの1/4であり，計算上は約6kV以上に帯電すれば着火の可能性がある。

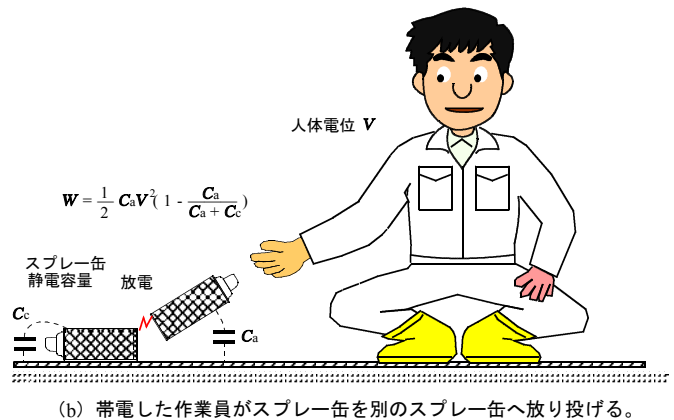
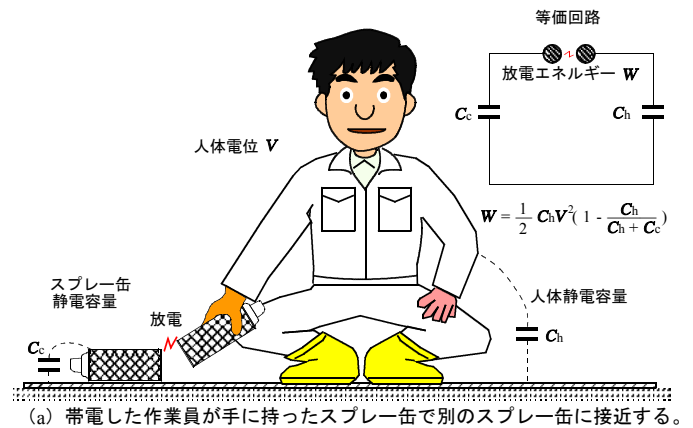


図27 帯電した空缶の間での放電現象実験

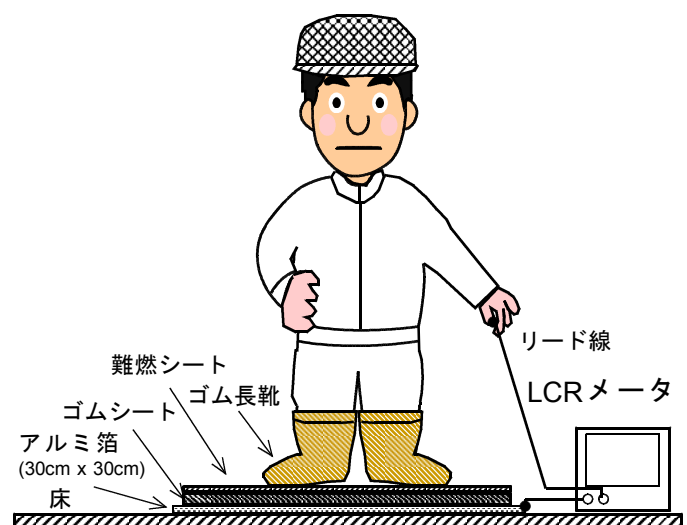


図28 人体の静電容量の測定方法

(2) 放り投げたスプレー缶と別のスプレー缶の間の放電

この場合の放電エネルギー W は以下のように表すことができる。

$$W = \frac{1}{2} C_a V^2 \left(1 - \frac{C_a}{C_a + C_c} \right)$$

ただし、 V [V] は人体の帯電電位、 C_a [F] は地表から十分な高さ (30cm 以上) に浮かせたスプレー缶の静電容量、 C_c [F] はスプレー缶 (横転) の静電容量である。

実測の結果、 $C_a=5.6$ pF、 $C_c=35$ pF であったから、ある人体電位における放電エネルギーは表 8 の第 4 カラムの通りとなる。この値は、人体の静電エネルギーの 1/22 であり、計算上は約 12 kV 以上に帯電すれば着火の可能性がある。

表 8 帯電した空缶の間の放電エネルギー計算値

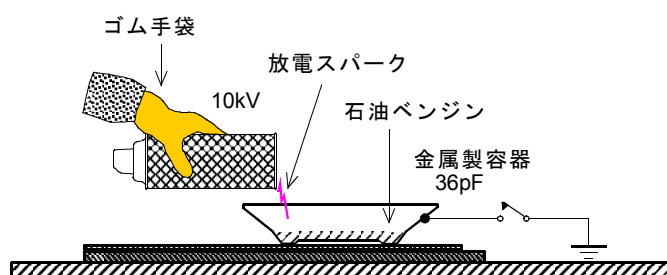
人体の帯電 [kV]	人体の静電エネルギー [mJ]	放電エネルギー [mJ]	
		ケース (a)	ケース (b)
2	0.21	0.053	0.010
4	0.84	0.21	0.039
6	1.9	0.47	0.087
8	3.4	0.84	0.15
10	5.3	1.3	0.24
12	7.6	1.9	0.35
15	12	2.9	0.54
20	21	5.3	0.97

7.2 人体及びスプレー缶帯電に伴う火花放電による着火検証実験

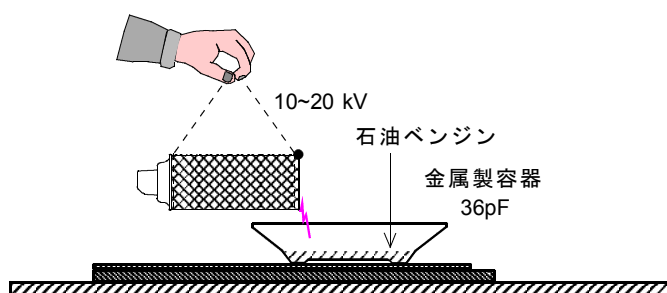
噴射剤 (LPG 及び DME) の爆発混合気を作って着火試験を行うことは実験設備の不備のため困難であったので、同様の最小着火エネルギーを有する石油ベンジン蒸気の混合気を用いて着火試験を行った。この方法は、図 29 (a) 及び (b) に示すように、金属製容器に石油ベンジンを適量入れて液面付近に自然に爆発性混合気を作り、これに帯電物体 (スプレー缶の空缶) を接近させ、放電を起こして着火を試みるものである。金属製容器は絶縁物の厚みを調整してスプレー缶 (横転) の静電容量と同程度 (36 pF) となるようにした。

なお、この方法は蒸気濃度が不明かつ安定しないので着火確率等の厳密なデータを得ることはできない。しかし、かなり着火しにくい条件での試験であるから、この試験で着火する場合には実際の現場でも着火の可能性が高いとみなしてよいであろう。

石油ベンジンは沸点範囲 50~90℃ 石油留分であり、ヘキサン (C₆H₁₄) を主成分 (60%) とする。石油ベンジンとしての最小着火エネルギーの公表値はないが、ヘキサンのそれは 0.24 mJ である。



(a) 帯電した人体とスプレー缶からの放電による着火実験



(b) 帯電したスプレー缶のみからの放電による着火実験

図 29 代替物質を用いた着火検証実験

(1) スプレー缶を手持って接近させ放電させた場合

人体を 10kV に帯電させたとき、約 50 回の試行の後、着火した。8 kV 未満では約 100 回までの試行で着火しなかった。

(2) スプレー缶を絶縁糸で吊して接近させ放電させた場合

20kV に帯電させたとき、約 40 回の試行の後着火した。15kV 以下では約 100 回の試行で着火させることができなかった。

以上のように、スプレー缶を手で持って放電させた場合には、10kV 以下の帯電電位で着火するから十分着火源となり得るが、スプレー缶を放り投げて放電させた場合には、20kV 程度まで帯電させる必要があるから、着火源となった可能性は(1)のケースよりもかなり低くなる。

8. 災害原因の推定

8.1 発火物

浸透探傷試験で使用されるスプレー缶には、噴射剤である LPG/DME はもちろん、原液にも大量の揮発性の可燃性物質が含まれていた。また、災害現場は屋内であり、かつ、周囲をフェンスで囲まれていたため風通しが悪く、可燃性蒸気・ガスが滞留しやすい条件であったと推定される。したがって、スプレー缶の内容物と空気の混合によって可燃性雰囲気形成されていたことは間違いないと判断される。

8.2 着火源

他に着火源となるものが見あたらないこと、及び以下の理由から静電気放電が着火源となった可能性が高い。

- (1) 床を導電性の低いゴムマット及び難燃シートで養生していたこと、並びに被災者が抵抗が極めて大きいゴム長靴を着用したので人体、並びに導電性の低いポリ袋等が帯電しやすい条件にあった。また、作業場の温湿度が約 29℃及び 10%以下と極めて低湿度であったことも、帯電をしやすくした要因となったと考えられる。
- (2) 災害発生前に処理したスプレー缶のうち、現像液を含むものは噴霧によって大量の静電気を発生した可能性があった。発生した電荷は直ちに人体に蓄積し、電位を上昇させたと推定される。特に、爆発の起こる直前に噴霧していた現像液(A)は、当時の温度条件においてはとりわけ電荷の発生量が大きいものであったので、このときに人体が危険なレベルに帯電した可能性が高い。更に、ポリ袋も噴霧によって帯電するから、人体があらかじめ帯電していなくても、ポリ袋に接近することにより、静電誘導現象によって危険なレベルに帯電する可能性がある。
- (3) 帯電した人体と何らかの物体との間で放電が発生し、これが着火源となった可能性が高い。この場合、放電の相手となる可能性のある物体は、放電エネルギーの大きい順に以下のようなになる。

- (a) 接地された金属物体

(b)別の作業員の体

(c)難燃シート上の空缶（ただし、作業員が保持した空缶との間）

(d)難燃シート上の空缶（ただし、作業員が放り投げた空缶との間）

(f)ポリ袋の内部の液体（特に、エタノール）で濡れた面

これらのうち、(a)及び(b)は計算上の放電エネルギーから判断して着火性は極めて高いが、現場の状況及び被災者の証言から判断すると、これらに接触したことはなかったように思われる。(c)及び(d)は、やや放電エネルギーは小さいものの、人体の帯電レベルによっては着火しうることが実験的に確認された。空缶は周囲に多く放置されていたので、作業員が気付かないうちに接触した可能性はある。(f)については、検証実験を行ったが着火性の確証が得られるほどの放電レベルには達しなかったもので、着火源となった可能性は他に比べてかなり低いと思われる。ただし、過去には、絶縁性の高分子素材で作られたフレキシブルコンテナが雨水で濡れて導電性を有したために着火性の放電を発生したと考えられる災害事例[6]があることから、これを完全に否定することはできない。

9. 同種災害の防止対策

スプレー缶には噴射剤として LPG 又は DME といった可燃性物質が含まれるが、本災害調査により、内容物の種類によっては噴霧に伴ってこれら可燃性物質を着火させるのに十分なレベルの静電気を発生する可能性のあることが明らかとなった。浸透探傷検査に限らず、スプレー缶を用いた作業は塗装、殺菌等数多くあるから、作業内容によって危険と判断される場合には静電気関連を含む爆発防止対策を実施する必要がある。以下に、その要点を述べる。

まず、スプレー缶の内容物（噴射剤及び原液）が可燃性物質を含むか否かを確認し、もし含む場合には以下の措置を執る。

- (1)周囲の風通しをよくし、可燃性ガス・蒸気の滞留を防止する。特に、内容物の多くは空気より比重が大きく足下に滞留しがちであるので注意する。
- (2)作業者は静電靴（JIS8103-2000 適合品）を着用し、もし床が十分な導電性（漏洩抵抗 $10^8\Omega$ 以下）を有さない場合には、足場に鉄板または導電性ゴムマット[7]を敷き接地する。その上で、通気性のある編手袋（軍手等）または導電性ゴム手袋等を着用し、人体を介して電荷を大地へ漏洩させることによりスプレー缶の帯電を防止する。
- (3)噴霧対象物体が金属等の導電性を有する場合には、これを接地する。ただし、ボンディングにより他の接地された構造物と電氣的に接続されている場合にはこの限りでない。
- (4)金属同士の激突による火花の発生を防止するため、スプレー缶及び金属製の道具類の取扱時には落下等の不要な衝撃を与えないよう慎重に行う。
- (5)局所排気設備、照明等電気機器を近傍で用いる場合には防爆構造を有するものとする。
- (6)特に、本件災害のように、袋の内部に向かって大量に噴霧する場合には、屋内での

作業を避け、屋外の風通しのよい場所で行う。

以上のような運用上の対策を行うことにより、確実に爆発災害を防止することが可能であるが、実際の作業現場ではしばしば対策が不十分となることが予見される。そこで、静電気の発生量が問題ない程度に小さいスプレー缶を開発することが望ましい。本報告書 5.2.4 で紹介したように、技術的にはノズルの孔径及び材質の選択ならびに若干の構造の見直しで実現可能と考えられるので、製造業者の積極的な対応を期待する。

10. おわりに

本件災害の原因として、スプレー缶の噴霧によって発生した静電気の可能性が高いことを実験事実を根拠として述べた。実は、日本国内でスプレー缶を用いた作業中に爆発・火災となった事例は過去にも多数あり、中には本件と同様に浸透探傷試験がらみのものが複数ある。残念なことには、これら過去の災害事例は静電気という観点から精査されることがなかったため、本災害調査の過程で明らかとなったような静電気に関する種々の知見を得る機会がなく、従って関係者への注意喚起がおざなりとなってしまったように思われる。今後は、本件災害及び調査結果が教訓となり、関係の労働現場で適切な帯電防止対策が推進されることを念願するものである。

参考文献

- [1] 三浦秀明，平田勝久，スプレー缶等の危険性に関する研究，消防研究室年報，No.18，pp.36-57，1989
- [2] 静電気安全指針，産業安全研究所技術指針 RIIS-TR-87-1, 1988
- [3] 静電気に起因する主な爆発・火災事例，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.17, 1999
- [4] 増田閃一，最近の静電気工学，高圧ガス保安協会，1974
- [5] 田畠泰幸，静電気放電に起因する可燃性ガス・蒸気の着火防止に関する基礎的研究，東京大学博士論文，1994
- [6] Laurence G. Britton, "Static Hazards Using Flexible Intermediate Bulk Containers for Powder Handling" Process Safety Progress, Vol.12, No.4, pp.240-250, 1993
- [7] 静電気用品構造基準，産業安全研究所技術指針 RIIS-TR-84-1, 1984