

# 災害調査報告書

原油タンク清掃時における火災災害

平成 20 年 1 月



独立行政法人  
労働安全衛生総合研究所

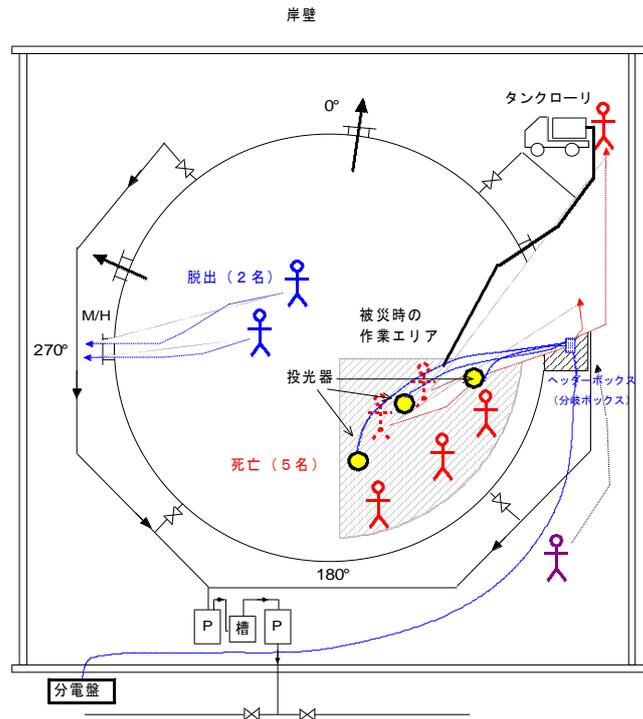
## 1. 災害の概要

平成 18 年、浮屋根式原油タンク（直径 75 m、高さ 25 m、容量 10 万 kL）の法定点検に伴う清掃作業（タンク底部に堆積した固形沈殿物（以下、スラッジという。）の除去作業）のため、作業員 7 名がタンク内部に入り、ワイパーを用いてスラッジを掻き取る作業を行っていたときに火災が発生した。出火後、作業員 2 名は近くのマンホールから外へ脱出し軽傷で済んだが、火元の近くで作業していた 5 名は死亡した（図 1 参照）。作業員の証言によれば、午後の作業を開始後しばらくしたとき、ドスツと音がしたので振り向くと、投光器がスラッジ上に落下しており、その近傍で火の手が上がっていた、そして、青白い火炎が急速に周囲へ伝播していったということであった。

死亡した 5 名のうち 2 名は入槽口から脱出したが、全身火傷でまもなく死亡した。したがって、タンク内で死亡したのは 3 名であるが、内部は加熱用金属管が密に設置されていたため移動が容易でなく、かつ、電気配線やガスマスク用エアラインも障害物となったようである。

スラッジは、外部から供給した共油(ともゆ)（軽油または A 重油）であらかじめ軟化させたものであり、その際に可燃性蒸気が発生するので外に仮設した電動ブロワー（防爆構造）で 2 箇所マンホールから排気を行っていた。作業を請け負った会社の社内規定では可燃性蒸気の濃度が基準値(1,400 ppm)以下となったときに入槽することとなっていた。そこで、当日午前 8 時 30 分に入槽口の近くで測定したところ 700 ppm であったので入槽し作業を開始した。その後、発災時（午後 2 時ごろ）まで濃度測定はしなかったようである。内部は採光が不十分なので、投光器（防爆構造）を持ち込み仮設台上に設置していた。全作業員は、呼吸用エアラインマスクと帯電防止素材で作られた防水合羽を着用して入槽していた。直近の気象台の記録によれば、当時の気温は 10.7 °C、相対湿度は 48% であった。本件については、当初、投光器が落下した際の打撃火花または電球からの輻射熱が着火源の有力候補とされたが、決定的な裏付けは得られなかった。

本研究所においては、過去の災害事例分析から、絶縁性被覆を有する金属の静電気危険性を示唆する結果を事前に得ており、本件についてもその観点からワイパーに着目して着火原因に迫ることとした。



(a) 発災前後の作業員の配置



(b) タンク入槽口の様子



(c) 投光器 (防爆構造)

図1 発災時の状況

## 2. 着火源の推定の根拠

本災害発生時に使用されていたワイパーと同型のもの写真を図2に示す。ワイパーの柄(以下、ハンドルという.)は金属棒に合成樹脂製被覆(ポリプロピレン)を施した構造である。これを手で掴むことにより、手袋と被覆の間で電荷が分離する(図3(a)). やがて手を離すと被覆に電荷の一部が残留し、さらに、この残留電荷によって金属棒は誘導帯電

を受け、電位が上昇するとともに、金属棒には電荷の偏りができる (図 3(b)). この状態で接地金属を接近させると火花放電を生じる (図 3(c)). 電荷分離は、手で掴むだけでなく、何らかの物体 (衣服やぞうきん等) でハンドルを擦った場合でも生じる。

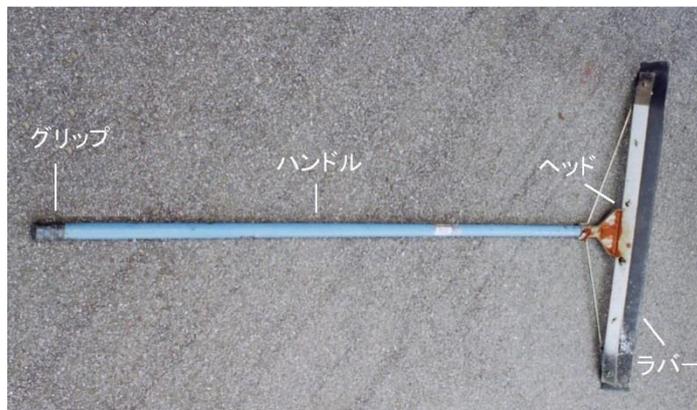


図 2 スラッジの掻き取り作業に用いたワイパー (同型品)

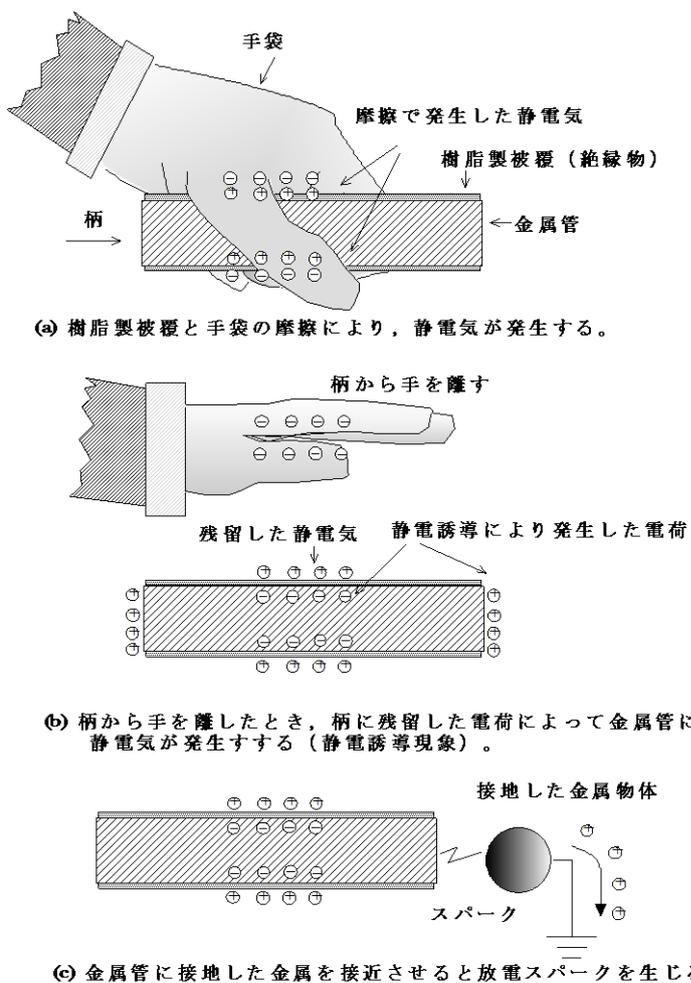


図 3 絶縁性被覆をもつ金属部 (ハンドル) の静電気帯電原理

### 3. 試料および実験方法

災害現場にてスラッジを採取するとともに、当時のものと同品質の原油、共油（軽油、A重油）を入手した。また、現場で使用されていたものと同型のワイパー（使用品および未使用品）、被災者が用いていたものと同型の衣服（未使用品）および手袋（使用品）を入手した。

#### 3.1 液体試料

スラッジ、原油、軽油およびA重油の引火点、発火点および導電率の測定値を表1に示す。これらは、それぞれ消防法危険物確認試験実施マニュアル、ASTM E-659 および静電気安全指針に規定する方法で測定した。

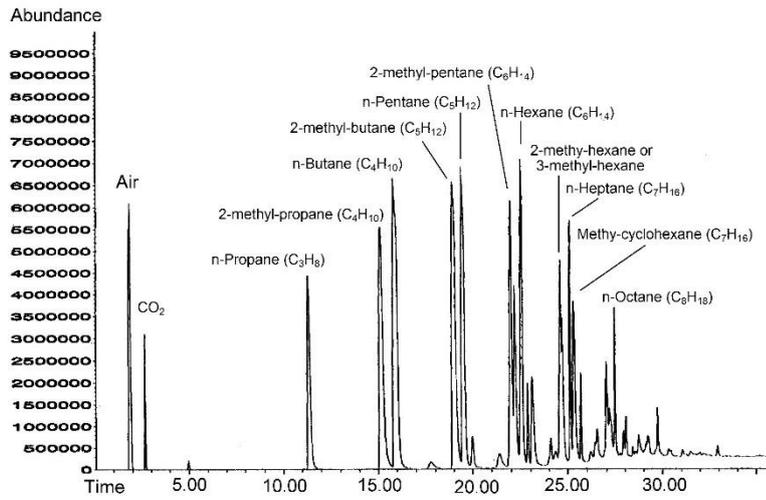
原油については、当研究所独自の装置を用いてその蒸気の着火エネルギーを測定した。その結果、測定温度 13 °Cにおいて、蒸気濃度は最大 3.7 vol%まで達し、その濃度で着火エネルギーの最小値 0.8 mJ が得られた。スラッジのサンプルからは揮発量が少なかったため、着火エネルギーの測定はできなかった。

表1 災害に関連した物質の特性

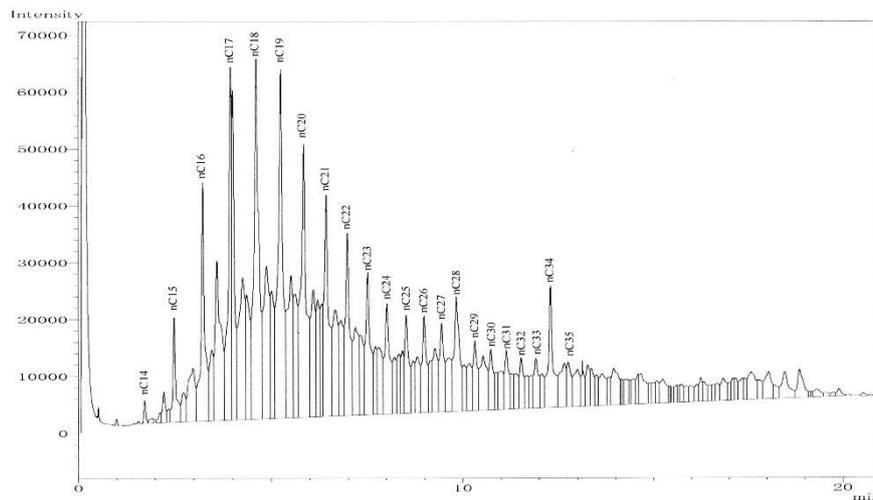
| 物質           | 引火点<br>(°C) | 発火点<br>(°C) | 導電率                   | 備考         |
|--------------|-------------|-------------|-----------------------|------------|
| スラッジ<br>(液状) | -6.0        | 343         | $1.0 \times 10^{-8}$  | 現場で採取      |
| スラッジ<br>(汚泥) | 未測定         | 未測定         | $7.7 \times 10^{-5}$  | 現場で採取      |
| 原油           | -20         | 233         | $2.7 \times 10^{-8}$  | タンク貯蔵物と同等品 |
| A重油          | 68.5        | 230         | $1.3 \times 10^{-12}$ | 共油         |
| 軽油           | 69.0        | 221         | $8.3 \times 10^{-10}$ | 共油         |

スラッジについて、揮発性の可燃性蒸気の成分およびスラッジをワイパーのハンドルにこすりつけ、布で拭き取ったあとでハンドルに付着していた成分を分析した結果を図 4(a) および(b)に示す。これらの分析結果から、当時の温度条件下でスラッジからは炭化水素 (C8 以下)が揮発し、0.8 mJ 以下の着火エネルギーを有する爆発性雰囲気形成され、また、ハンドルには石油ワックス(C14~C35)が付着していた可能性が高いことが示唆される。

なお、工業的に精製された石油ワックスは抵抗率が  $10^{13} \sim 10^{17} \Omega \cdot m$  と極めて高い物質であり、電気絶縁材料としても使用されている。



(a) スラッジに含まれる揮発性成分



(b) スラッジに含まれる不揮発性成分 (石油ワックス)

### 3.2 用品類の静電気特性

ワイパーの被覆 (ハンドルから剥がしてシート状とした.), 手袋および帯電防止加工した合羽の体積抵抗率および表面抵抗率を測定した結果を表 2 に示す. 被覆は, 表面を清浄にしたもの(以下, 「清浄」という.)と表面にスラッジを付着させ布で拭き取ったもの(以下, 「汚染」という.)を試料とした. 注目すべき点は, 「汚染」の方が「清浄」よりも表面抵抗率が高いということである. これは図 4 (b)の分析からもわかるように絶縁性の高い石油ワックス成分が残留したためと考えられる. これは, スラッジの導電率(表 1)からは予測しがたい結果であった. また, 合羽は帯電防止作業服の規格 (JIST 8118) に準拠した検定を受けてはいないが, 同規格に規定されたタンブラー法により発生電荷量を測定したところ, 0.26 ~

0.38  $\mu\text{C}$  であった。これは、基準値である 0.60  $\mu\text{C}$  以下であるので、帯電防止性能はあると判定される。

なお、ワイパーのラバーはクロロプレンゴムであり、導電塗料をラバー先端とハンドルに塗って抵抗を測定したところ、 $2 \times 10^{12} \Omega$  以上であった。したがって、ワイパーはタンクの床と電氣的に絶縁されていた可能性がある。

表 2 作業に関連した不導体部分の静電気特性

| 部位             | 物質名     | 厚さ<br>(mm) | 体積抵抗率<br>( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | 表面抵抗率<br>( $\Omega$ ) |
|----------------|---------|------------|--------------------------------------|-----------------------|
| ハンドル被覆<br>(清浄) | ポリプロピレン | 0.5        | $5.3 \times 10^{14}$                 | $6.4 \times 10^{12}$  |
| ハンドル被覆<br>(汚染) | ポリプロピレン | 0.5        | $5.3 \times 10^{14}$                 | $1.2 \times 10^{13}$  |
| 手袋             | 塩化ビニール  | 1.0        | $3.9 \times 10^8$                    | $3.9 \times 10^{12}$  |
| 合羽 (帯電防止加工品)   | ナイロン    | 0.12       | $5.8 \times 10^{12}$                 | $1.6 \times 10^{12}$  |

### 3.3 ワイパーの静電気帯電実験方法

現場作業員からの聞き取りをもとに、ワイパーを用いた掻き取り作業を模擬し、そのときの金属部の電位を静電電位計で測定した。掻き取り作業は、ブラッシング(図 5 (a))および休止(図 5 (b))の繰り返しとした。災害発生時の天候を考慮して、温度は 10  $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 50 % の環境試験設備内で実施した。

### 3.4 着火実験方法

金属製オイルパン(60 cm  $\times$  40 cm  $\times$  10 cm)に原油を入れ、直流高電圧電源で帯電させたワイパーから液面付近のオイルパン内壁に向かってスパーク発生させ、原油に着火するか調べた(図 6)。この実験は温度 8.2  $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 21 % の屋内実験設備で実施した。

## 4. 結果および考察

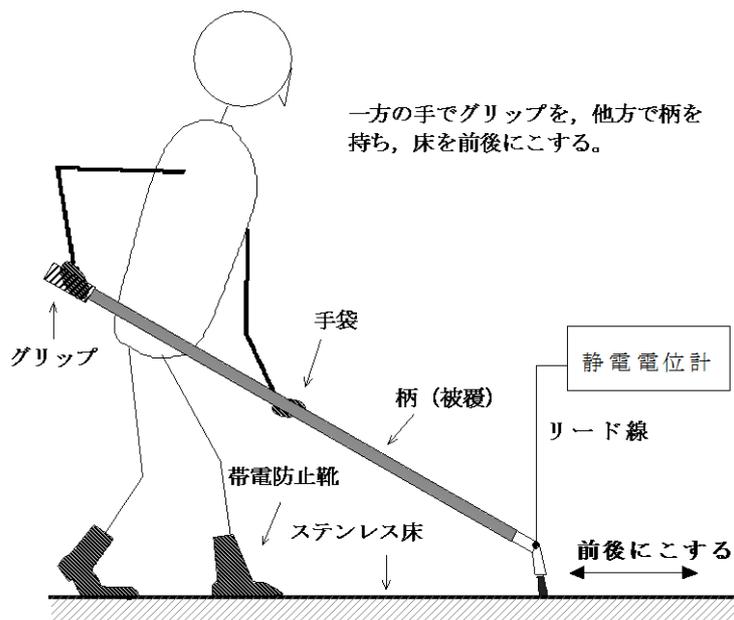
### 4.1 作業中の電位変化と静電エネルギー

手袋 6 双 (いずれも現場での使用歴あり)、ワイパー 8 本 (うち 2 本は使用歴あり、他は未使用品) を用い、ワイパーは被覆を清浄にしたときと、被覆にスラッジを塗り、布で拭き取ったときの組み合わせで、作業中の電位変化を測定した。

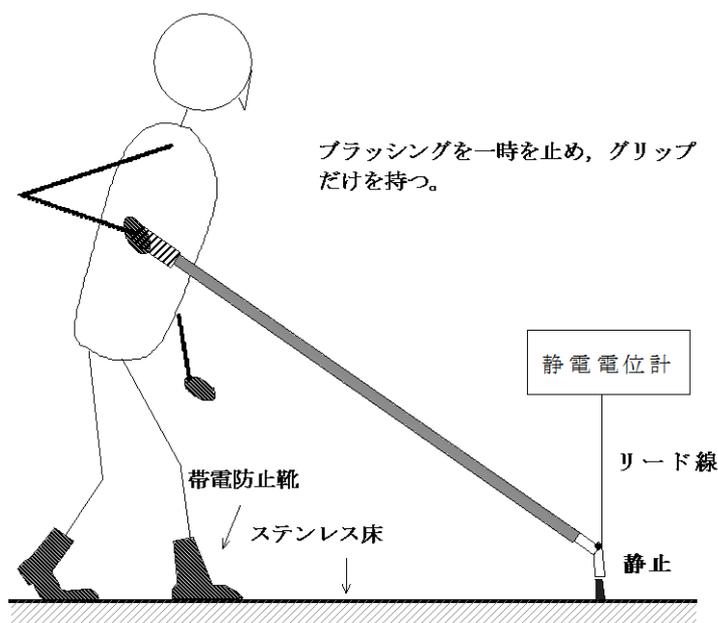
電位変化の典型例を図 7 に示す。ブラッシング中には電位はほとんど上昇しないが、片手を離して休止すると一瞬で電位が上昇する。これは、2. で解説したように、手袋とハンド

ルの被覆との間で静電荷が発生し、手を離れたときに被覆に残留している電荷によって金属部が静電誘導を受けたためである。ラバーの抵抗が大きいため電荷緩和は緩慢である。

各組み合わせにおいて得られた電位の最大値のみをプロットしたものが図 8 である。ここでワイパー 6 および 7 は使用歴のあるワイパーである。図から明らかなように、汚染した状態では清浄な状態よりもかなり電位が高くなった。これは、表面に付着している石油ワックス成分の影響であり、前述のように表面抵抗率が増加することが要因の一つとして挙げられる。



(a) ブラッシング中



(b) ブラッシング停止中

図5 ワイパーによる掻き取り作業中に発生する静電気の実験

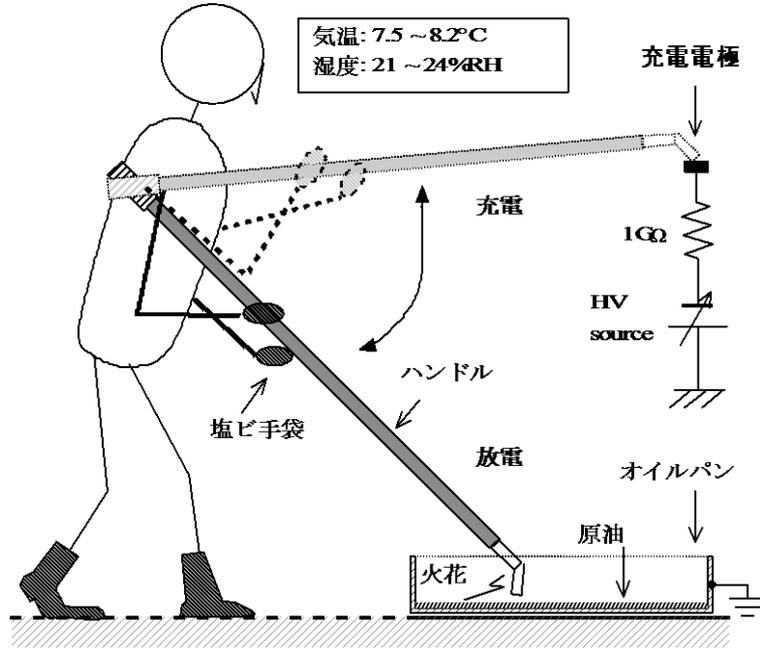


図6 帯電したワイパーによる原油の着火実験

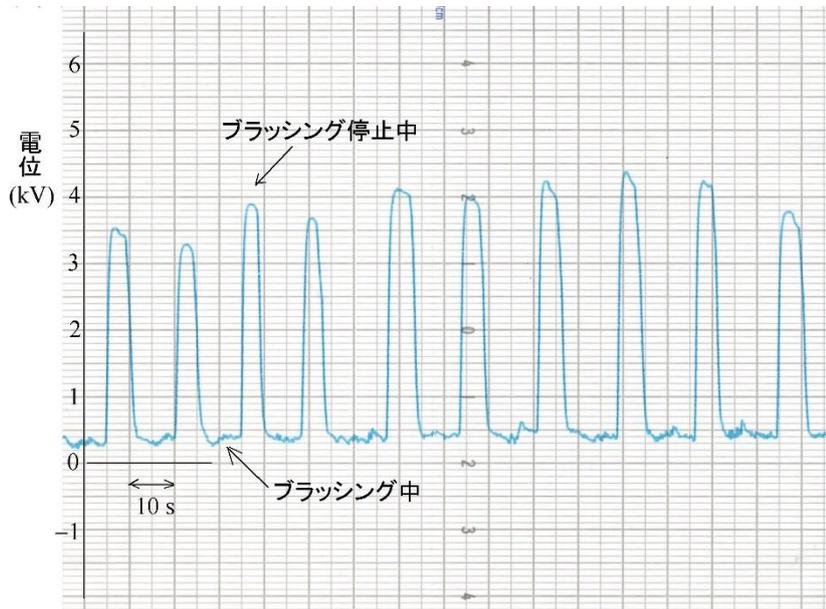


図7 掻き取り作業実験中のワイパーの電位変化

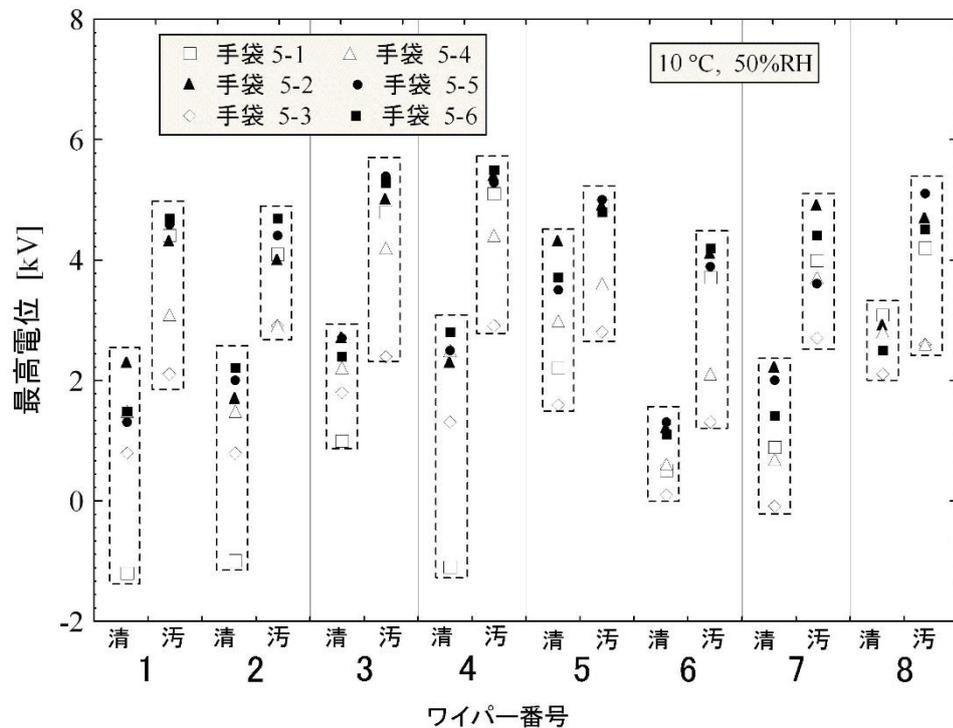


図 8 ハンドル清浄及び汚染時の電位の違い

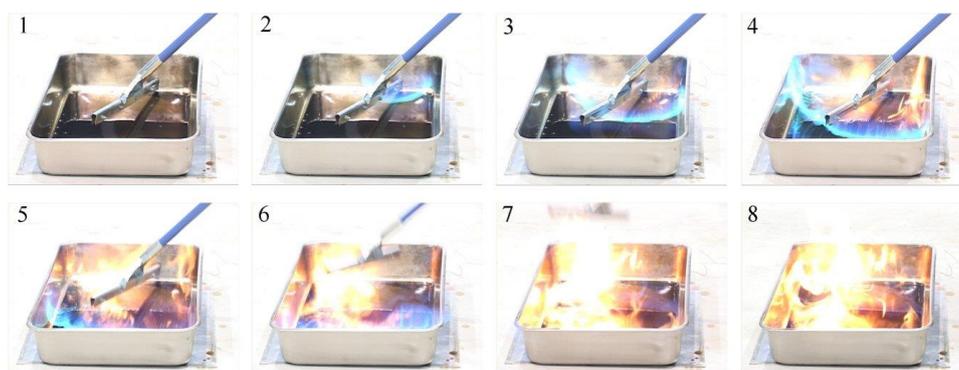
休止の姿勢 (図 5 (b))でのワイパーの静電容量は  $52\sim 70\text{ pF}$  であったので、汚染した状態で得られた最高電位  $4.7\sim 5.5\text{ kV}$  を用いて計算すると、発生した電荷は  $0.26\sim 0.36\text{ }\mu\text{C}$ 、静電エネルギーは  $0.51\sim 0.91\text{ mJ}$  となる。ハンドルを手で掴んだときの有効接触面積を  $100\text{ cm}^2$  と仮定すると、平均表面電荷密度は最大で  $36\text{ }\mu\text{C}/\text{m}^2$  となる。理論上、導体表面に蓄積する表面電荷は気中放電 (空気の絶縁破壊電界  $3\text{ MV}/\text{m}$ ) で制限されるので最大電荷密度は  $27\text{ }\mu\text{C}/\text{m}^2$  であるが、本件のワイパーのように、金属体の表面に薄い絶縁層がある場合、絶縁層表面での電位および電界の上昇が抑えられ、より大きな表面電荷密度となりうる。

#### 4.2 着火実験

ワイパーの充電電位を  $5\text{ kV}$ 、 $6\text{ kV}$ 、 $6.5\text{ kV}$  および  $7.0\text{ kV}$  に変化させて着火実験を行ったところ、 $5\text{ kV}$  および  $6\text{ kV}$  では着火しなかったが、 $6.5\text{ kV}$  および  $7.0\text{ kV}$  では図 9 に示すように、着火・炎上した。そのときの放電エネルギーは、それぞれ  $1.3\text{ mJ}$  および  $1.5\text{ mJ}$  と推定される。これは、3.1 で示した着火エネルギーの最小値  $0.8\text{ mJ}$  よりもやや大きい。開放容器での実験なので蒸気濃度が不安定だったためと推測される。4.1 では、作業を模擬した実験で得られた最大の静電エネルギーは  $0.91\text{ mJ}$  であるから、着火に必要な

レベルには達している。

ここで注目に値するのは、1.で示した被災者の証言「青白い火炎が急速に周囲へ伝播していった」という部分である。今回の着火実験でも着火直後、液面上を青白い火炎が伝播していくようすが観測されている。したがって、災害発生時にはタンク内の清掃対象領域ではスラッジ表面上には爆発濃度に達する予混合気が形成されていたと推定される。



1:着火直前  
2-4:予混合ガス燃焼伝播(青い炎)  
5-8:蒸発燃焼に変わる(オレンジの炎)

図9 帯電したワイパーによる原油の着火実験

#### 4.3 死亡者数の多さに関する考察

本件災害では、5名という多数の死亡者が発生した。そのうち2名は、タンクから脱出したものの、着衣が焼失し全裸に近い状態で発見されている。被災者のうちの一人が着用していた合羽を図10に示す。被災者は、作業服(木綿製のつなぎ服)の上に合羽を重ね着していた。帯電防止と汚染防止を考慮したものであろう。これらの着衣について、繊維製品の燃焼性試験方法(JIS L 1091)のA-4法に準拠した燃焼性試験を実施したところ、各サンプル片(320 mm × 50 mm)の燃焼結果は、すべて「全焼」で、全焼に要した時間は10秒以内であり、易燃性と判定された。このことは、本件災害のように、不測の火災となった場合に作業員の衣服に引火し被害を拡大する要因になるものである。したがって、可燃性物質による危険がある場所では、帯電防止作業服は不燃または難燃性の素材とするのがよい。



図 10 被災者が着用していた合羽（帯電防止加工品）

## 5. 同種災害の防止対策

本災害は、原油又はスラッジに含まれる揮発性成分が爆発性混合気を形成し、これに何らかの火花（ワイパーの帯電による静電気放電の可能性が高い。）で着火したと考えられる。これをふまえて、さらに、現時点で判明した災害原因に関する情報を基に、安全管理の観点から見た同種災害の防止対策を検討する。

### 5.1 安全管理の観点から見た問題点の整理

次の 2 点に着目し、安全管理上の問題点と同種災害防止のための対策についてまとめる。

- a) 原油タンク清掃中（メンテナンス中）の火災であること。
  - ・火災発生を想定できたか？
  - ・できなかったとすればなぜ想定できなかったか？
- b) 外部委託（下請け）業者による作業であること。
  - ・作業に伴うリスク存在の認識が現場作業者にあったかどうか？

## 5.2 管理問題への対策（要因別）

ここでは、人的要因，設備管理要因，作業環境要因，管理的要因に分け，同種災害の再発防止のために取り組むべきことを列挙する。

### (1) 人的要因

#### a) 作業者による危険源の把握と注意

- ・作業前ミーティングなどで，作業者全員が危険物，着火源となり得るものの存在，及びその取扱い方法などを十分に把握しておくこと。

#### b) 作業中の作業者間の情報交換

- ・作業開始後も危険源（ハザード）の存在，作業ミスなどによるリスク発生の可能性を認識し，気付いた点についてはお互いに情報交換しておくこと。

#### c) 緊急時対応の確認

- ・万一の場合に備え，各自が災害時の対応（避難経路，連絡手順など）について確認し，それぞれの役割を把握しておくこと。

#### d) 作業規程の遵守

- ・規程の作業着・靴を着用（必要に応じ，静電気帯電防止品などを選定）すること。

### (2) 設備管理要因

#### a) 設備（作業補助機器：今回の場合，投光器）の安全な取り扱い

- ・設備はマニュアルに従って正しく使うこと（使用条件の遵守）。
- ・不要な改造をしない（特に，防爆構造に影響を与えるものは厳禁）。
- ・倒れないように設置すること（投光器は留め具などで固定されていなかった。作業の簡便性を犠牲にしても，転倒時の危険性を考えれば，固定すべき）。
- ・倒れても引火しないような工夫が必要である（スラッジ等に接触しない）。
- ・全く別の機器を使う（目的を達成できる別の機器を探す）。

#### b) 使用機器の特性把握

- ・使用する機器の性質（使用環境や誤使用によっては温度上昇の可能性があることなど）を把握しておくこと。
- ・防爆対策と防火対策を区別して検討し，確実に実施しておくこと。

### (3) 作業環境要因

#### a) 作業現場（暗い，狭い，不安定な足場など）の改善

#### b) 避難経路の確保（投光器の設置場所）

#### c) 取扱い物質の特性把握とリスク評価

- ・作業に伴うリスクを（作業者とともに）事前に評価（確認）する。
- ・作業範囲に存在する物質の特性（引火点とそれに達する危険要因など）を作業者も理解しておくこと。理解していない場合，投光器の転倒に伴う引火，火災などは予想できない。

#### (4) 管理的要因

- a) 作業者への安全指導（作業手順や内容の確認だけでなく、危険源の把握と注意喚起）
- ・ 毎日の安全管理業務（作業前確認など）をパターン化しない。
    - － 毎日のミーティングがパターン化されてしまうと危険性の意識が薄れる。
    - － 毎日リセット（「昨日は問題なかった、・・・」は安全であることの理由付けにはならない）
  - ・ 作業者一人一人に対して作業内容（作業の目的・意図、作業に伴うリスク）を把握させる（経験の有無に左右されないこと）。
  - ・ 作業者に作業環境（安全作業のための用具、作業着の目的など）の特性を知らせること（なぜ静電気帯電防止用品を用いているかなど）。
- b) 作業現場でのリスク確認（危険源の把握）
- ・ 事務所で作業前ミーティングだけでなく、実際の作業現場で関係作業者全員がリスク要因（ハザード）の確認、情報交換を行う。
  - ・ 監督者は作業現場にて指導、教育を行う（改正安衛法にも関連する）。
- c) 管理者の所在場所の確認
- ・ 作業管理者は作業現場にて監視すること（作業中の危険を早期に発見するため）。
  - ・ 安全管理上、重要な作業を行っている時は、その監視場所を離れない（あるいは、副責任者を置くなどの配慮が必要）。
  - ・ 一人の管理者が安全管理を必要とされる複数の区域を担当しない（管理上の問題を見逃しやすくなる）。
- d) 災害時の対処方法の検討
- ・ 避難経路の確保、避難方法・消火活動・作業者の救助方法の確認を行っておく。

#### 5.3 安衛法に基づいた対応

平成 18 年 4 月に施行された改正安衛法の第 31 条の 2 では、一定の危険有害な化学物質を製造し、又は取り扱う設備の改造、修理、清掃等の仕事の発注者などがその仕事による労働災害を防止するために必要な労働安全衛生に関する情報を請負人に提供する仕組みを要求している（発注者側による情報提供、管理義務）。今回は法改正前に発生した事故であるが、下記、条項に書かれているように、請負業者への情報伝達の重要性を認識し、確実に実施することの重要性を示している。

（参考）改正安衛法（第 31 条の 2）

化学物質、化学物質を含有する製剤その他の物を製造し、又は取り扱う設備で政令に定めるものの改造その他の厚生労働省令で定める作業に係る仕事の注文者は、当該物について、当該仕事に係る請負人の労働者の労働災害を防止するため必要な措置を講じなければならない。

#### 5.4 明らかになった問題点と今後、取り組むべき課題

今回の災害調査で明らかになった問題点と今後、取り組むべき課題についてまとめる。

##### (1) 明らかになった問題点

- a) 作業現場に存在するリスク（設計図面上では発見されなかったハザード）発見の重要性（どうしたら気付くことができるか？）
- b) メンテナンス作業に伴うリスクの事前評価方法の必要性

##### (2) 今後、取り組むべき課題

- a) 通常的设计，運転を対象とした安全性評価では想定されないハザード発見方法の確立  
今回の事故の場合，清掃作業中に発現しうるリスクまでは想定できなかった。
  - ・メンテナンス現場には，設計時（作業計画時）の安全性評価では明らかにできないハザードが存在する。
  - ・設計時には運転中の作業ミスによるリスク発生については想定（検討）されるが，メンテナンス作業中（今回の場合，清掃作業中）の異常発生を想定することはなく，また対策については検討されていない。
- b) ハザード発見のための作業基準の導入
  - ・“作業（機器，操作）に対する基準からのずれが生じたら・・・（例えば，機器の誤使用，作業ミス）”を起点として解析（評価；リスクの発見）を行う。
  - ・例えば，次のような作業基準（表現）を用いて，リスクの発見を試みる。  
作業基準：『器材（機器）を用いて作業（操作）を行い，状態を変化させる（挙動）』
- c) 作業現場での安全確認作業（手順）の作成の重要性
  - ・現場を見なければ気付かないハザードの存在に気付くようにするためには，どのようにリスク評価を実施すべきか？
  - ・防爆対策と防火対策の区別

#### 6. まとめ

石油タンク清掃中に発生した火災の着火源について調査を実施した。その結果，絶縁性被覆をもつワイパーが，ハンドルの把持という単純な所作によって静電気帯電し，さらに，これにより静電誘導を受けてワイパーの金属部分が高電位となったため，この金属部分から発生した静電スパークによってスラッジの揮発成分に着火した可能性が高い。

同種災害の再発を防止するためには，可燃性雰囲気が存在する場所では，絶縁性被覆を有する清掃具の使用を避けることが重要である。また，人体の被害を軽減するため，着衣を難燃性または不燃性のものが望ましい。

この種の作業においては，事前に入念なリスクアセスメントを行うことが重要であり，その際には，本報告書 5.に記載の事項を考慮することを推奨する。