

# 災害調査報告書

## 化学工場における クエンチオイル（冷却油）の火災災害

独立行政法人 労働安全衛生総合研究所

## はじめに

本報告は本災害のもととなった漏洩原因，着火源および再発防止対策について述べる。はじめに災害の概要，漏洩原因，次に漏洩したクエンチオイルの物性について述べ，発災当日のプラント内の状況および種々の調査結果から科学・合理的に推察された着火原因について述べ再発防止対策について検討している。また，この災害は安全管理がきちんと実施していれば未然防止できた事故であったので，安全管理面についても調査結果を報告している。

## 1. 災害概要

### 1.1 事故概要

発生時刻：11時31分頃

発生場所：エチレンプラント内分解炉10階 クエンチフィッティング元弁フランジ部

天候：気温12℃，湿度50%，風向 西北西，風速 4.5 m/s

事故の形態：火災

火災起因物質：配管より漏洩した混合油（クエンチオイル）

### 1.2 発災した設備の概要

エチレンプラント内では，原料として受け入れたナフサや灯油などを分解炉（炉内1200℃，反応管内約800～850℃）で熱分解し，水素・メタン・エチレン・プロピレン・ブタジエン・ベンゼンおよび重質燃料油に至る分解ガスを生成する。分解炉からでたガスは，急冷熱交換器により370℃（通常運転時。発災時は343℃）まで一時冷却され，さらにクエンチオイルと呼ばれる混合油によって約200℃まで冷却され，ガソリン分離塔へ送出される（図1-3）。通常クエンチオイルは0.67 MPa 約170℃（発災時漏洩部は0.41 MPa）で冷却系に送液されている。

クエンチオイルは通常運転では冷却部（クエンチフィッティング）へ送液されているが，反応管内に溜まった炭素（コーク）を除去する工程（デコーキング）を行う際には，図1-3のようにクエンチフィッティング元弁と仕切板を使用して流路を遮断する。デコーキング作業の頻度は月に1度程度であり，デコーキング終了後は再び仕切板をスペーサー（仕切板を入れていないときにフランジに挟む穴の開いた仕切板と同じような形状のもの）に交換して，弁を開いて送液開始し通常運転に入る。

発災した2F-208は11階建て，2年前にボイラー落成検査を行い稼働に至っている。発災したクエンチフィッティング元弁は2F-208の10階北端に位置する。

図 1-1~1-2 略

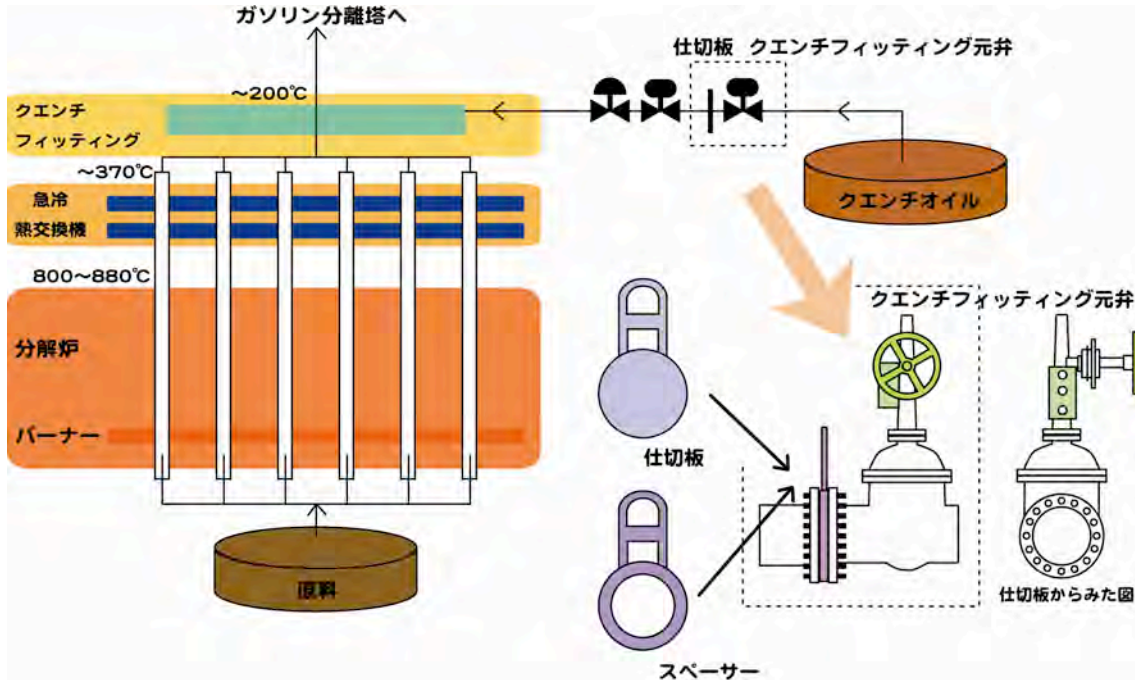


図 1-3 分解フローとクエンチフィッティング元弁廻り概略

図 1-4 略

### 1.3 災害発生前の 2F-208 における作業状況

発災日 4 日前～発災日前日	灯油分解運転実施
発災日前日 13:35 頃	仕切板取付け作業
発災日前日 16:45～発災日 03:10	デューキング実施
発災日 11:20	仕切板抜き出し作業開始

### 1.4 災害発生状況

災害は、クエンチオイル配管中に挿入された仕切板の抜き取り作業中に起きた。仕切板（約 80kg；材質 SB410 圧力容器用炭素鋼；寸法：図 1-5）は槽（鉄パイプの支持枠）にナイロンスリングと呼ばれる吊り具でつり下げられたチェンブロックにより引っ張り上げられ、配管より抜き取られる。作業中、近傍にあるクエンチフィッティング元弁が何らかの理由で作動し、開放中の配管継ぎ目からクエンチオイルが噴出した。その後火災が発生した。

また、プラントでは当日、仕切板引き抜き作業とは別に、7～8階にまたがる出口配管保温板金取付け作業、ラック3階でナフサの元弁の仕切板を抜く作業が行われていた。聞き取り調査により得られた作業の詳細はつぎの通り。

11:00 頃 作業管理者現場に到着

11:20 頃 協力会社からの作業員4名が隣接する2F-206のエレベーターで8階まで登り、ラッチを通して9階から2F-208階に入って現場に到着。作業開始。

防爆型ノンスパーク打撃ハンマーによるハンマリングで仕切板のガスケット固定を緩めて配管のボルトを緩める。

11:30 頃 配管のボルトを緩める作業が終了。(仕切板を上に取り外すためフランジ上部のボルトのみ外す)。このとき、仕切板と元弁の間に残液がないことが確認された。仕切板をチェーンブロックで持ち上げる作業中、元弁が作動する音がする(図1-7)。

クエンチオイルが噴出。作業管理者・協力会社社員退避開始\*。火災拡大。

11:33 頃 計器室において第2エチレンプラント緊急停止操作が取られる

11:36 頃 クエンチオイル送液用圧力ポンプ停止

約6分間のクエンチオイル漏洩量は推定約165トン。これは大型タンクローリー5.5台分に相当する。

23:13 鎮火確認

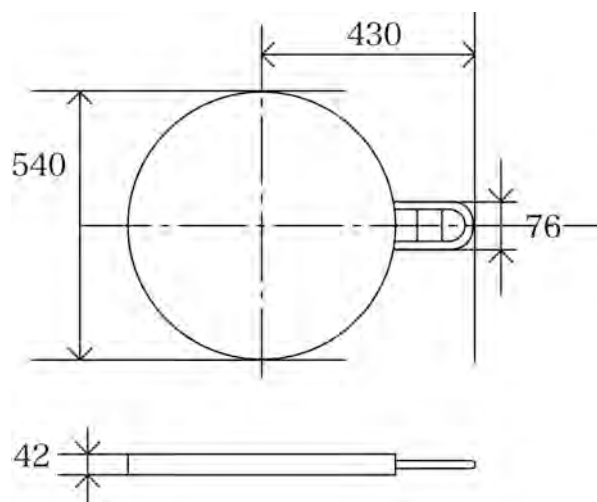


図 1-5 仕切板の形状 (単位 mm)

図 1-6～1-7 略

## 1.5 被害状況

### 1.5.1 人的被害

4名死亡

被災者	作業内容
協力会社男性1 (27歳)	仕切板入替作業
協力会社男性2 (25歳)	仕切板入替作業
協力会社男性3 (45歳)	7～8階にまたがる保温板金取付工事
協力会社男性4 (56歳)	7～8階にまたがる保温板金取付工事

### 1.5.2 物的被害

2F-208 発災フロア (10階) および上階 (11階), 階下 (9・8・7階), ほか隣接する 2F-207 にも激しい焼損が見られる。損傷およびクエンチオイルの飛散は 2F-206 にも確認されている。

## 2. 漏洩原因の調査

### 2.1 フランジ部

現地調査において、仕切板取りだし作業が行われていた配管フランジ部は、締結していた 16本のボルトのうち上部の数本のみ外した状態で仕切板を抜き取られていた。フランジ部は仕切板を抜き取った後の隙間が 53mm 程度あった (図 2-1 右図)。



図 2-1 フランジ部 (左図：事故後のフランジ部, 右図：フランジの間隙距離)

クエンチオイル漏洩時の仕切板の高さは、チェーンブロックの巻き取り状況などから、図 2-2 のようにフランジ部に挟まっていた位置より 3 cm 程度上方にあったと考えられる。なお、仕切板はナイロンスリングが焼失して、チェーンブロックが付いたまま床に落下していた。

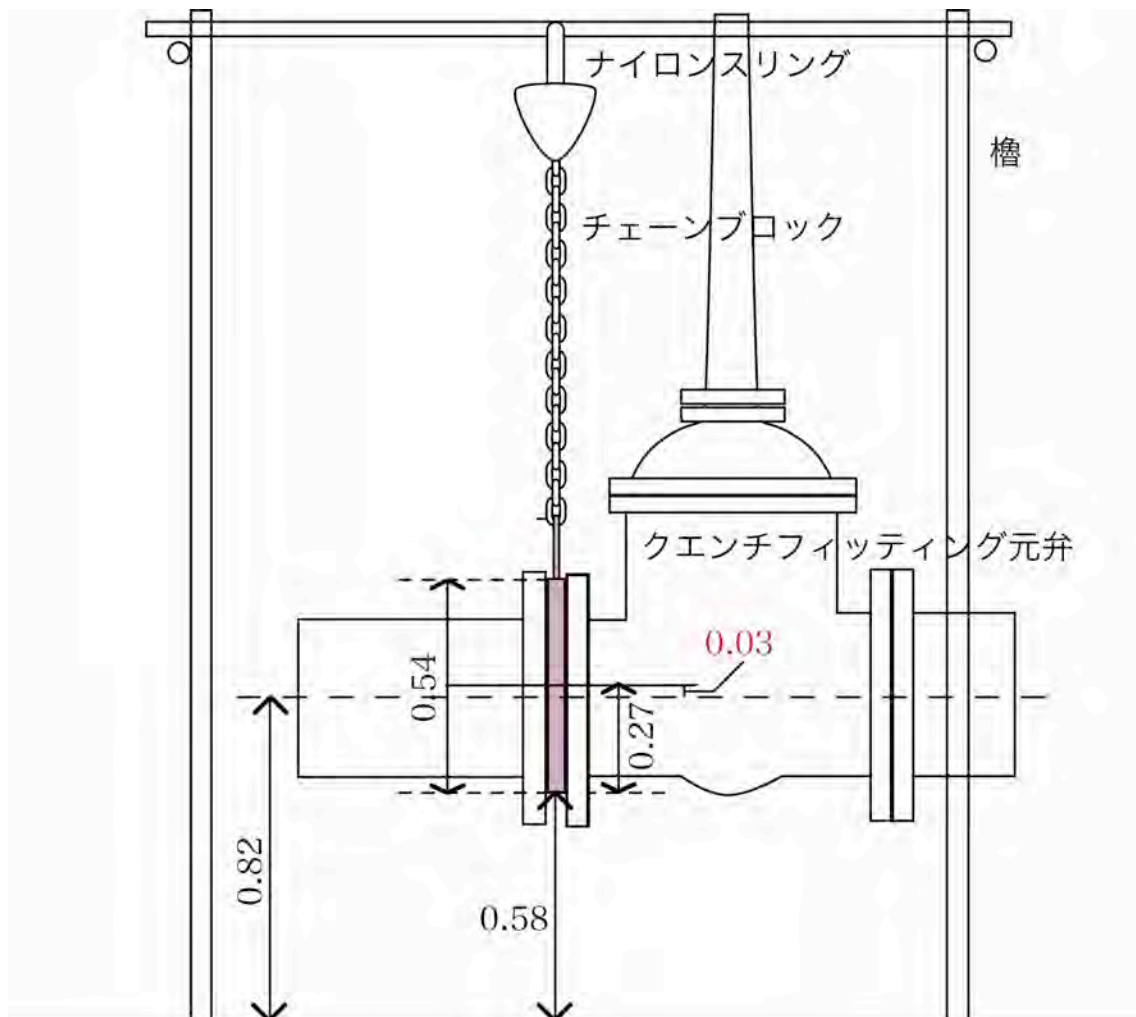


図 2-2 発災時の仕切板の位置 (単位 m)

## 2.2 クエンチフィッティング元弁

フランジ部に隣接して、クエンチフッティング元弁（AOV：Air Operated Valve）があり、クエンチフィッティング装置へクエンチオイルを供給するラインの開閉を行う。駆動は空気で行われており、空気配管は圧力配管用炭素鋼管である。開閉方法はハンドルによる手動の操作のほか、切替スイッチで行う。遠隔操作は不可である。発災直前にクエンチフィッティング元弁が作動した音が聞こえたとの監督署の調査結果があり（作動時の排気音はかなり大きい）、クエンチオイルの漏洩は、何らかの原因で閉じていたクエンチフィッティング元弁が作動し開き始めたためと推定される。

## 2.3 異常昇圧による閉止状態の弁からの漏洩

元弁のバルブの損傷、閉弁機能の損失の原因の一つとして異常昇圧現象がある。密閉された流体が温度上昇することにより設定圧力を上回る圧力が発生する現象である。クエンチオイルは当該元弁だけでなく隣接する 2F・202～207 にも供給されており、発災までのトレンドデータに異常昇圧を示す現象は見られないため、異常昇圧によるクエンチオイル漏洩の可能性はほぼ無い。

また、仕切板入替作業前に仕切板と元弁の間の残液が無いことが確認されており、クエンチオイルの大量漏洩を引き起こしたのが弁の不完全な閉止のためとは考えられない

## 2.4 クエンチフィッティング元弁駆動装置

クエンチフィッティング元弁は駆動用ハンドルあるいは切替スイッチ（図 2-3）により操作される。仕切板入替作業の前にクエンチフィッティング元弁の漏れはなかったため、仕切板入替作業中に駆動用装置の誤作動により弁が開いたと考えられる。

それを裏付けるように、事故後の調査で元弁の開度は開度計で 50%を示していることが確認され、また弁内部調査により、弁が開いていたことが明らかになっている（付録写真：図 A-6）。全開までの作動時間は 382 秒（約 6 分）であることから、開度 50%に至るまで約 3 分経過していることとなる。発災後 2 分後に計器室で第 2 エチレンプラント緊急停止措置が行われており、また空気の供給が絶たれた場合には弁はその箇所で停止するため、弁の作動が停止したのは緊急停止措置のためであるといえる、その後、クエンチオイル送液用ポンプが停止されるまで 6 分間オイルが漏洩し続けた。

弁が開いている間は駆動用空気が排気されているため、大量のオイルが噴出している箇所に空気が供給されて可燃性混合気が形成された可能性がある。すなわち、着火源さえあれば着火が可能な状況であった。

# 駆動用ハンドル

## 切替スイッチ

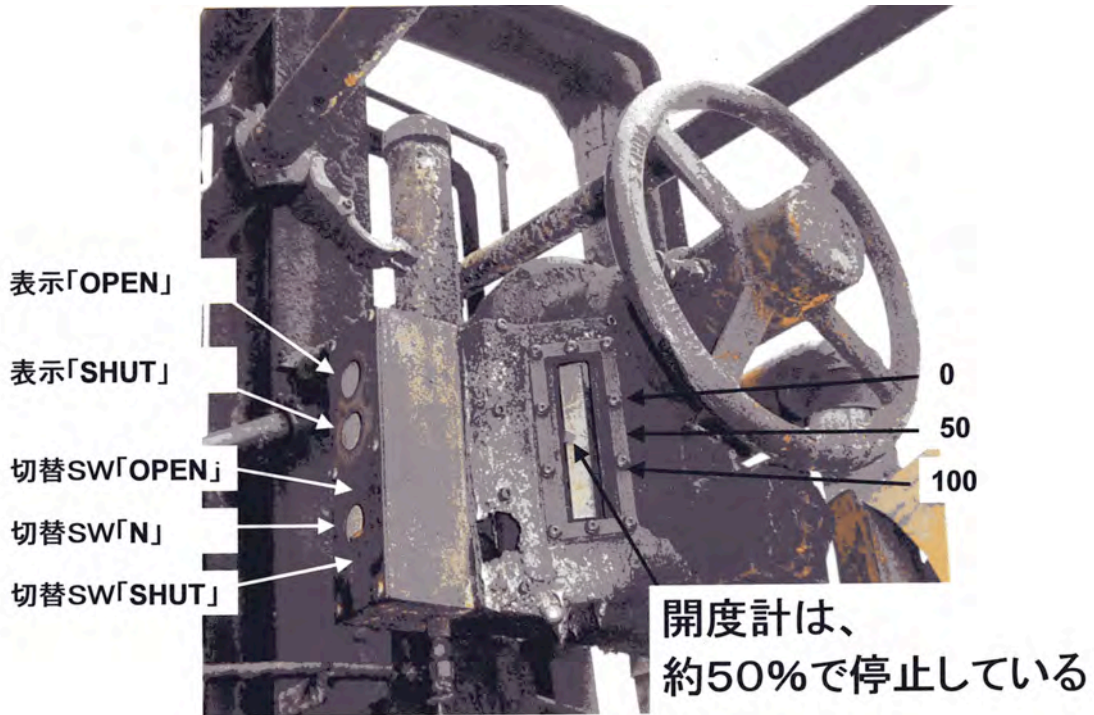
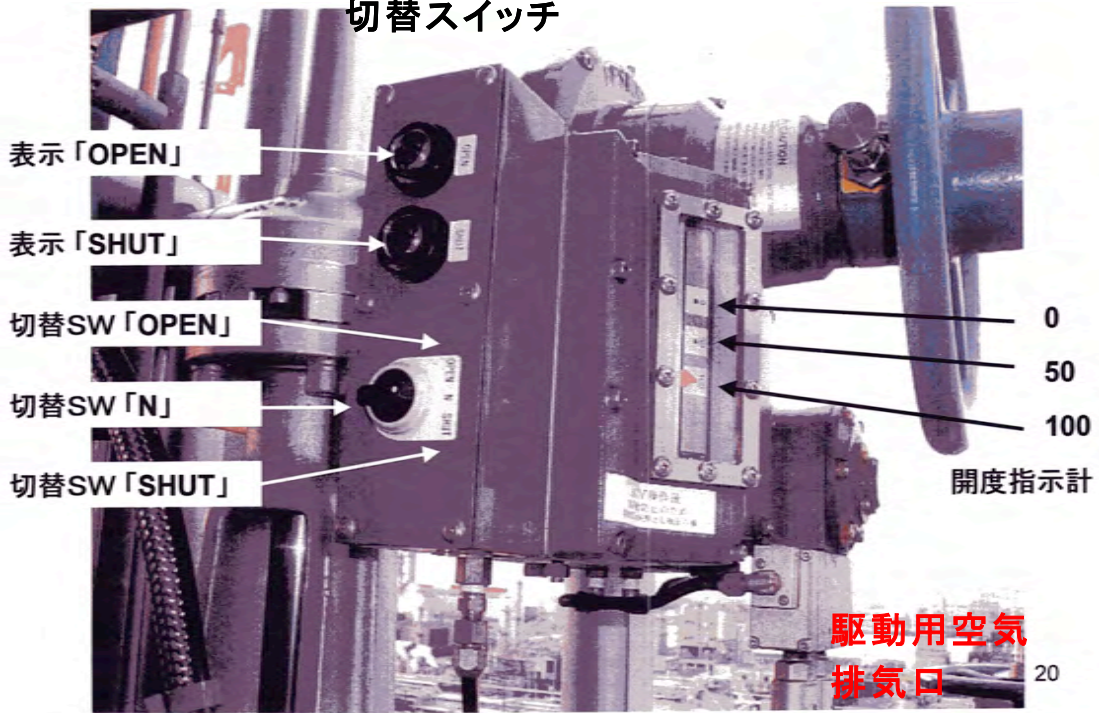


図 2-3 クエンチフィッティング元弁駆動装置（上：事故前，下：事故後）



### 2.4.1 駆動用ハンドル

駆動用ハンドルは仕切板取り替え作業を行っていた作業者の身長よりも高い位置にあり、またチェンブロックなど、周辺の器具がぶつかる位置にないことから、動かそうとする意図が無ければ動かない。このハンドルおよび切替スイッチは監督者以外による操作は禁止されていた。

### 2.4.2 クエンチフィッティング元弁切替スイッチ

切替スイッチには OPEN（弁が開く）－NEUTRAL（動作停止）－CLOSE（弁が閉じる）の3段階があり、スイッチによりエアの流路方向を変えて弁を開ける方向、閉める方向に流して弁を操作する。可動性は高い（軽い力で容易に動く）。チェンブロックを用いた隣接するフランジ部の仕切板抜き出し作業に於いて、チェーンの輪が切替スイッチに引っかかり、開方向に回してしまった可能性がある（図 2-4）。

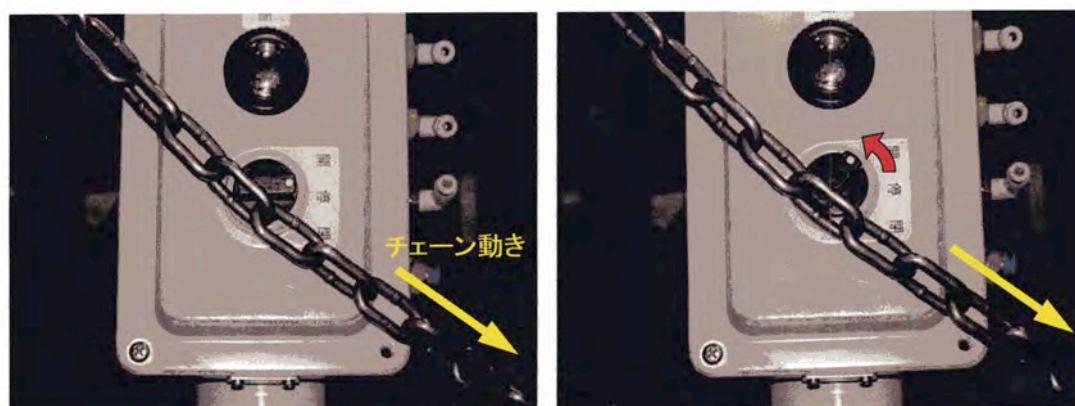


図 2-4 チェンブロックによる元弁切替スイッチ操作テスト（左：スイッチが NEUTRAL 位置，右：チェンブロックによりスイッチが OPEN 位置に動く）

## 3. 化学的要因の調査

周辺に火災に関与したと考えられる可燃物が無いことや事故時の証言から、クエンチオイルが火災原因物質である。

### 3.1 クエンチオイルの物性

#### 3.1.1 成分

原因物質であるクエンチオイルは石油留分の熱分解による残留重油であり、沸点 360℃以上の成分が 44.9wt%であった。ただし、ベンゼン（引火点-10℃）、スチレン（引火点 32℃）

などに代表される沸点 200℃以下の成分も 0.4wt%あった。残りの 54.7wt%は沸点 200～360℃の成分であるが、この成分の主要な組成にナフタレン（引火点 79℃）、ビフェニール（引火点 112.8℃）、アセナフテン（引火点 135℃）、アントラセン（引火点 121℃）など引火点 160℃以下の化学物質が多く挙げられる。なお、不純物としてコーク（カーボンの塊 ～3 mm）も数百 wtppm 含有していた。

表 3-1 略

### 3.1.2 クエンチオイルの物性

クエンチオイルの物性は次の通り。

表 3-2 クエンチオイル物性

物性	結果	備考
電気抵抗率	1.9×10 <sup>10</sup> Ωm (20℃) 2.7×10 <sup>8</sup> Ωm (68℃)	
比誘電率	2.9 (40℃)	
着火エネルギー	0.29 mJ (3.5vol%)：0.26 mJ は不着火 0.25 mJ (4.0vol%)：0.22 mJ は不着火 0.21 mJ (4.5vol%)：0.19 mJ は不着火 0.21 mJ (5.0vol%)：0.19 mJ は不着火)	測定温度 150℃ 一般に炭化水素の最小着火エネルギーは 0.2 mJ
引火点	141℃ (クリーブランド開放式)	蒸気が燃焼範囲に達する温度
燃焼点	160.3℃ (タグ開放式)	引火後 5 秒間燃焼が継続可能な温度
発火点	クエンチオイル：457℃ ( ) 酸化鉄との混合物：479℃ 断熱材の混合物：558℃	測定は ASTM 法 酸化鉄は鑄を模擬
自己発熱開始温度	410℃	自己発熱を開始する温度

## 3.2 当日の周辺における火気使用

当日、溶接作業などの火気使用はない。喫煙は指定場所のみ許可されており、プラント内は火気厳禁場所であった。被害状況から地上へ延焼していないため、地上の車両による火気等は除外される。

## 3.3 周辺の高体温

クエンチオイル飛散箇所周辺の高体温、および焼損エリアにあった高温箇所については次の通り。発火点および自己発熱開始温度（表 3-2）より、400℃程度以上の高温体でなければ数分以内にクエンチオイルが着火に至ることは難しいと考えられる。

### 3.3.1 熱交換器出口の点検用ノズル

2F-208 の発災フロア 10 階に分解ガスを急冷する熱交換器がある（付録写真図 A-7）。内部温度は約 370℃、表面温度は約 150～200℃との報告がある。この温度では発火は極めて困難である。また、クエンチオイル飛散箇所からの距離は 6m である。このフランジ部

は保温材無しで露出した状態であるが、金属板で覆われており、飛散したクエンチオイルが直接接触することは困難である。仮に飛散したクエンチオイルの蒸気が表面で発火した場合、6 m の距離を火炎が伝播すると考えられるが、現場に居合わせた作業員によれば、クエンチオイルが噴出している箇所へ火が走ってくる様子は見られなかった。また、表面温度がクエンチオイルの発火点に達していないため着火源と考えるのは困難である。

### 3.3.2 連続ブローダウン弁

熱交換器に隣接して連続ブローダウン弁が設置されているが、付け根部分に焼損が見られた。内部流体温度は 300～310℃、推定表面温度は 100～150℃との報告があり、上記点検用ノズルと同様に、着火源とは考えにくい。

### 3.3.3 保温工事箇所

発災時、2F-208 の 8 階では保温施工工事が実施されていたため、高温配管が露出していた可能性がある。内部流体の温度は 485℃であるが露出した配管表面温度はそれよりも低く、配管表面は発火温度には達していないと考えられるが、焼損が激しく工事作業者が死亡しているため実施状況が不明であるため可能性は完全には否定できない。露出した断熱材に含浸したクエンチオイルの蓄熱発火の可能性については、発火点測定（表 3-2）より否定される。

## 3.4 混触危険性

物質には他の物質と混合あるいは接触することによって温度上昇・発火・爆発に至る場合がある。そのような危険性を混触危険性（混合危険性）と呼ぶが、危険性を生じる組み合わせは主に

1. 酸化性物質と還元性物質（可燃性物質）
2. 酸化性塩類と強酸
3. 不安定物質を作る混合
4. 不安定物質と遷移金属の混合

である。クエンチオイルの主な成分は炭化水素であり反応性の高い不安定物質ではないため、3、4は除外される。また酸化性塩類でも強酸でもないため2の組合せとして反応が開始されることはない。1についても、事故現場周辺にすぐに着火に至らしめる強酸化性物質がないことから、除外される。

## 4. 電氣的要因の調査

### 4.1 エレベーター

頻繁に始動・停止を行うエレベーターはモーターの過熱・ショート・スパークが火災に

寄与する可能性があるが、作業者が使用した現場周辺のエレベーターは 2F-207 を挟んだ 2F-206 にあり、発災した 2F-208 の現場への影響は殆どないと考えられる。始動電流などによる迷走電流についても、2F-206 のエレベータ上部から通路・配管などの金属具材を伝わってより上層階にある(より電位の高い)発災箇所迷走電流が到達する可能性は低い。

そのほか迷走電流を発生する可能性のある電気溶接工事は当日行われていない。

## 4.2 電動機

2F-208 の 11 階の ID ファンとよばれる送風機がある。ID ファンには三相誘導電動機であり安全増防爆構造 eG3 が施されている。ID ファンの設置は 2F-208 設置時に完成しており、事故当時稼働していた発災日の約 19 ヶ月前と約 12 ヶ月前に点検記録が残っている。事故後の現場調査より、ファンが大きく焼損した形跡が見られないことから着火源としての可能性は低いと考えられる。

## 4.3 オイル噴出による静電気帯電

液体の噴出による静電気の発生は噴出する液体と配管等との電荷分離による。噴出した液体の帯電の程度はこの接触に依存するので、噴出する液体の速度と液体と配管等との接触面積に依存する。一般に速度が速い、接触面積が大きいほど大きくなる。また、液体の帯電は導電率にも依存する。導電率が高いと接地した配管等を通して電荷が緩和するからである。この電荷緩和の時定数 $\tau$ は液体の導電率 $\sigma$ と誘電率 $\epsilon_r$ によって

$$\tau = \epsilon_r \epsilon_0 / \sigma$$

で表すことができる。ただし、 $\epsilon_0$ は自由空間の誘電率  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m である。クエンチオイルの導電率と比誘電率は測定(表 3-2)から、 $\sigma = 52$  pS/m (20°C), 909 pS/m (40°C), 3700 pS/m (68°C), また、 $\epsilon_r = 2.9$  (40°C)である。被災時の 165°C の導電率は外挿により 27000 pS/m となり、高導電率の液体である。比誘電率は温度によって緩和時間に影響するほど変化しないので測定値をそのまま採用すると電荷緩和時間は 0.95 ms である。配管内の流動による帯電は無視できるほど緩和時間は十分に短い。噴出することがなく接地された配管内を流動する通常の工程では大きく帯電する液体ではないことがわかる。ただし、温度が低くなると低導電率となるので注意を要する液体である。

噴出の場合はその瞬間から電荷緩和の効果を失うので、噴出の帯電は配管内の流動のそれよりも高くなる。噴出したクエンチオイルの質量電荷密度  $q$  は実験的に調査した結果(4.3.1 参照)より、1 nC/g から 10 nC/g 程度と推定できた。

### 4.3.1 噴出帯電の測定

クエンチオイルをステンレス容器にいれてリボンヒータにより 165°C までに加温し、こ

れに所定の圧力 (0.2~0.5 MPa) の窒素を封入して、このステンレス容器に取り付けられてノズル (内径 0.2, 0.4 mm) より噴出した液体をファラデー缶 (電氣的に絶縁した金属一斗缶を接地した金属で覆ったもの) で受けその電荷をクーロンメータ、また、その質量を電子天秤で計測して質量電荷密度を測定した。これらの実験値からクエンチオイル流出の初期段階の質量電荷密度は 1~10 nC/g と推定した (一般に噴出による帯電は噴出の速度が大きくなるほど、接触面積 (ノズル径) が大きくなるほど大きくなる)。なお、噴出速度は流量とノズル径から算出した。この実験の噴出速度は 15~30 m/s であった。クエンチオイルの初期の流出速度は 12 m/s 程度である (図 4-2)。この速度は流量 (図 4-1) を AOV の開いた部分の面積で除して算出した。なお、クエンチオイルの比重は 1.02 である。

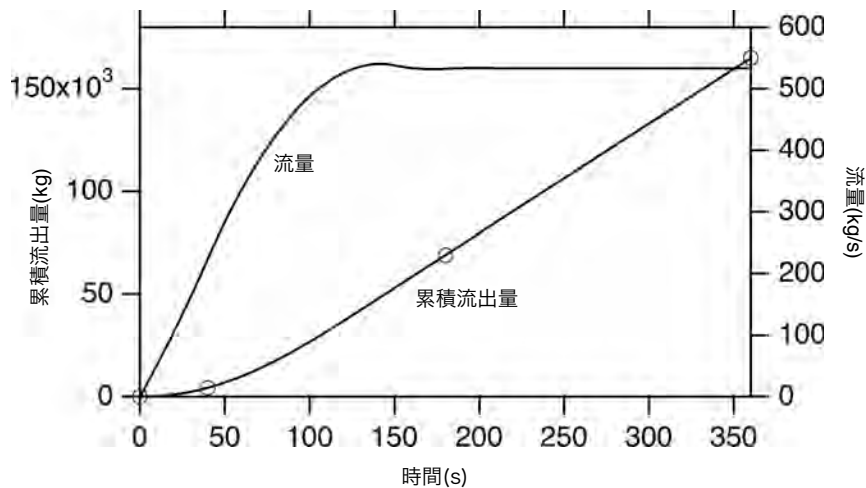


図 4-1 クエンチオイルの流出

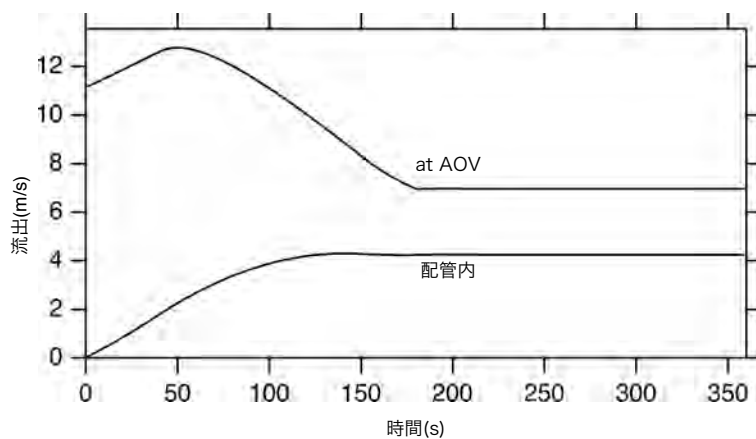


図 4-2 噴出・流動速度

## 4.4 静電気放電の可能性

電氣的に絶縁された導体からの放電を考察する。このような導体は作業員およびチェーンブロックとそれに取り付けられた仕切板である。チェーンブロックはナイロンスリング（抵抗は絶縁抵抗計で測定不能： $2\text{ G}\Omega$ 超）で金属パイプで組んだ櫓に固定されているため、配管に接触しないかぎり電氣的に絶縁状態にあった。なお、チェーンが配管等に接触していてもその接触抵抗は小さくない。チェーンリング同士の接触も同様である。チェーンが錆びていればなおさらである。

床面であるチェッカープレートの漏洩抵抗は数カ所で測定したが大きくても数百キロオームであったので、床は静電氣的に接地されていると考えられる。

### 4.4.1 作業員

作業管理者はミドリ安全製の帯電防止靴を着用していた。一方、協力会社からの作業員 C、D ともに静電靴ではなかった。帯電したクエンチオイルを浴びた場合、十分帯電し、放電が可能であったといえる。

### 4.4.2 櫓およびチェーンブロック

チェーンブロックを掛ける支持棒（櫓）は、塗装無しで、底部にベース金具が取り付けられている。ベース金具は床に固定されていないが、床と接触しており導通はあったと考えられる。一方、チェーンブロックは通常ワイヤーで支持棒に掛けるが、発災時はナイロンスリングと呼ばれる吊り具を使用していた（ナイロンスリングは支持棒など支持体を痛めることなく使用できる）。このナイロンスリングは絶縁体であったため、ナイロンスリングにつり下げられているチェーンブロック、および仕切板は電氣的に絶縁していた可能性があり、噴出したオイルにより帯電した場合、十分に放電の可能性はある。

## 4.5 ページング

現場では保全立ち会いの社員および運転担当の社員のみ無線ページングを使用しており、本質安全防爆構造によって防爆されている。使用周波数は  $1800\text{MHz}\sim 2000\text{MHz}$  帯であり、出力は  $10\text{mW}$  以下である。通常の使用で着火源にはならない。

また、有線ページングシステムは壁取付型の端局は本体が耐圧防爆構造、送受信器は安全増防爆構造を有しており、スピーカーは安全増防爆である。したがって、ページングシステムは着火源になる可能性は低い。

## 4.6 電動工具

当日の事故現場の階下で実施されていた断熱工事の工事安全指示書には、充電ドライバーの記載があり、担当していた協力会社社員が携帯していた可能性がある。充電ドライバ

一は現地で確認されておらず、また作業担当者が死亡のためクエンチオイル漏洩時に使用していたかどうかは不明であるが、4.6.1の実験的調査より着火源となった可能性は十分に低い。

#### 4.6.1 充電ドライバーの着火性

8階で充電ドライバーが使用されていたとも推定できるので、充電ドライバーの着火性について実験的に考察した。充電ドライバーの直流モータのブラシ-整流子間で発生する電気火花が着火源となる可能性があるからである。現場で見つかったものと同型式の充電ドライバーはプロパン（最小着火エネルギー0.25 mJ）においても着火することはなかった。ただし、これを分解して、ブラシ-整流子間をむき出しにすると着火した。電気火花自体は着火する能力があるが、筐体内にあると消炎効果等により着火しにくくなっている、また、この充電ドライバーには冷却のためファンがついているため着火しにくい構造にある。分解して火花部を開放した場合は消炎効果およびファンの影響がなくなるためと考察できる。

また、165°Cのクエンチオイルをミスト状に噴霧した状態でも充電ドライバー筐体をはずしたときの電気火花で着火することはなかった。したがって、充電ドライバーが着火源となる可能性は低いと考えられる。

実際に現場で充電ドライバー内の電気火花が着火源となるためには、充電ドライバー内にクエンチオイルがガス化して燃焼の下限界以上の侵入してなければならない。このような状態は、充電ドライバーの外部は相当の濃度になっているはずであるので、クエンチオイルの悪臭からこれを使用していた作業者が気づいているはずであろう。

#### 4.7 そのほか

当日の雷注意報はない。

電氣的要因ではないが、仕切板と配管の衝撃火花は着火源として可能性は十分に低い（いずれも材料は炭素鋼で炭素鋼同士の衝撃火花は炭化水素系の気体に対して着火源となることは著しく難しい：北川徹三著，基本安全工学，海文堂，1982）。

### 5. 火災発生原因の推定

発災当時の状況から、火災で燃焼したのはクエンチオイルであることは間違いないので、火災の発生原因（着火源）について推定する。

#### 5.1 静電気による着火

##### 5.1.1 作業者からの静電気放電

クエンチオイルの流量を示す図4.1より、流出の初期段階の流量を100 kg/sとすると、電荷密度からクエンチオイルの流出による電流 $I$ は推定した質量電荷密度（1～10 nC/g）より0.1 mAから1 mAとなる。この値は非常に大きな値である。導体の静電気対策とし

て産業レベルで発生する静電気による電流を設備などの導体に対しては大きくても 0.1 mA として、作業員に対しては大きくても 0.01 mA（人はマニュアル作業であるので設備等のそれよりも静電気の発生電流は小さい）として考慮して、それぞれの漏洩抵抗を規定している。帯電したクエンチオイルの流出による電流はこれに比べて大きいことがわかる。多量な流出が短時間に起きたことがこのように異常に多量な静電気を発生させている。

この発生電流では静電気対策のもととなる基準のレベルを超えているので、作業員が帯電防止靴（漏洩抵抗  $10^8 \Omega$  以下）を着用・不着用にかかわらず着火リスクがあったことは確かである。実際は協力会社の社員は帯電防止靴を着用していなかった。一般作業靴の漏洩抵抗は  $5 \times 10^9 \sim 10^{14} \Omega$ （測定値）であったので、作業員の靴の漏洩抵抗を  $10^9 \Omega$  とする。作業手順と当時の作業段階から作業員のうち少なくともひとりが配管の開口部の目前に立っていたと推定できるので、その作業員に流出した多量のクエンチオイルが連続的にかかっていたであろう。この量を流出量の 1/10 とするとこの作業員への電流は 0.01 mA から 0.1 mA となる。この電流が作業靴の漏洩抵抗  $R$  を通して接地へと流れるので、作業員の電位  $V$  はオームの法則 ( $V = IR$ ) から 10 kV から 100 kV となる。この電圧では作業員の一部（例えば、指先、顔などのむき出し部）が接地した導体などの近くにある、あるいは近づくときに静電気放電が簡単に起こるレベルである。ここで、作業員は革手袋していたと推定できるが、使い古して縫い目にすきまができるか、あるいは、手首、顔などが接地金属部に近づいても放電は可能である。

図 4-1 の累積流出量の 1/10 がかかっていたとして、少なく見積もって、質量電荷密度を  $1 \text{ nC/g}$  とすると、作業員の電位の時間変化は図 5-1 のようになる。噴出後すぐに高電位に帯電することがわかる。実際にはこのように電位が上がり続けるわけではなく、放電によって電位が下がり、また、さらなる帯電により電位が上昇して、断続的に放電するという現象となるであろう。

この放電のエネルギーは帯電電位  $V$  を 10 kV として  $5 \text{ mJ (@}100 \text{ pF)}$  から  $15 \text{ mJ (@}300 \text{ pF)}$  となる。ここで、エネルギーは  $0.5CV^2$  より計算している。ただし、 $C$  は人の静電容量であり、一般に  $100 \sim 300 \text{ pF}$  である。これはクエンチオイルの最小着火エネルギー  $0.21 \text{ mJ}$  よりも十分に大きい。

作業員にクエンチオイルが連続的にかかっていたいなくても、静電気着火の可能性があるのでこれについても示す。最小着火エネルギー  $0.21 \text{ mJ}$  となるための作業員の帯電電荷  $Q$  は  $0.2 \mu\text{C (@}C=100 \text{ pF)}$  から  $0.35 \mu\text{C (@}C=300 \text{ pF)}$  となる。ここで、エネルギーを  $0.5Q^2/C$  より計算している。クエンチオイルの電荷密度は  $1 \sim 10 \text{ nC/g}$  であるので、 $20 \text{ g (@}q=10 \text{ nC/g, } C=100 \text{ pF)}$  から  $350 \text{ g (@}q=1 \text{ nC/g, } C=300 \text{ pF)}$  もかかれば十分である。



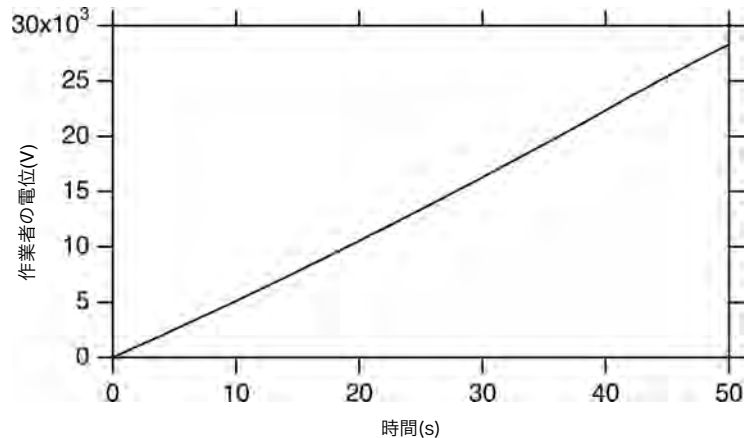


図 5-1 作業者の帯電電位

### 5.1.2 仕切板からの静電気放電

次に仕切板からの静電気放電について考察する。仕切板とそれに取り付けられたチェーンブロックの静電容量は 30 pF 程度である。これは仕切板を半径 0.27 m の円板 ( $8\epsilon_0 \times 0.27 = 19$  pF) とし、また、チェーンブロックをチェーン部も含めて半径 0.1 m の球 ( $4\pi\epsilon_0 \times 0.1 = 11$  pF) として計算した値である。配管の開放部近くに仕切板がある、または、先の配管近くにいた電氣的に浮いた作業者がかかっているとクエンチオイルが連続的にこれにかかるので、少なく見積もってもクエンチオイル流量の 1/10 はかかっているであろう。この仕切板が接地された配管からある時間だけ離れるとその時間分だけ仕切板が帯電して、ふたたび配管に近づくときその帯電電荷は放電する。この放電エネルギーがクエンチオイルの着火エネルギー以上となるためにはどのくらいの時間だけ配管から離ればよいのか計算すると次のようになる。

放電エネルギーがクエンチオイルの最小着火エネルギー 0.21 mJ を超えるために ( $0.5Q^2/C = 0.21$  mJ), 必要な仕切板の電荷  $Q$  は 0.11  $\mu$ C 以上である。これをクエンチオイルの質量で表すと 11 g (@10 nC/g) から 110 g (@1 nC/g) で十分である。また、この電荷が帯電したときの仕切板の電位は 3.7 kV となり、静電気放電を起こすに十分な電圧である。先の作業者からの放電で示したようにクエンチオイルの流出の電流の 1/10 は  $i = 0.1$  から 0.01 mA であるので、求める時間  $t (= Q/i)$  は 1.1 ms (@ $i = 0.1$  mA) から 11 ms (@ $i = 0.01$  mA) と非常に短い時間で十分である。チェーンブロックの長さ等 (槽高さ 2.5 m, ナイロンストリング部 0.12 m, チェーンブロック 1.1 m, 仕切板取っ手部 0.16 m, 仕切板径 0.54 m, 配管フランジ (径 0.64 m, 配管 16B) の下は床から 0.5 m) から仕切板はもとの位置から 3 cm 程度高いに位置 (図 2-2) にあり、仕切板の重さ (約 80 kg) および開放部の隙間 (53 mm : 図 2-1) から、この程度の時間は仕切板が配管から離れることは十分に可能と考えら

れる。したがって、仕切板からの静電気放電も着火源となった可能性がある。

さらに、仕切板（厚さ 42 mm）が配管の隙間（53 mm）にあり、配管に触れていないとすると、初期段階の噴出した帯電ミストで仕切板が帯電する。AOV が開くととも増大する噴出の勢いで仕切板が押されて接地された配管に触れたときでも十分に着火性の放電は可能である。ただし、仕切板が配管開放部の間隙内にある場合はこれらの寸法から電位が高ければ配管に近づかなくても放電可能な距離にある。AOV が開くとともにクエンチオイル濃度が増大して可燃上限を超えることもあるが、上記のような非常に短い時間に着火に必要な十分なエネルギーを蓄積できるので、可燃性濃度にある間に、すなわち、証言にも一致するような漏洩からすぐに着火する可能性が十分にある。

連続的に仕切板が絶縁された場合の電位の時間変化を示す図 5-2（図 4-1 の流量の 1/10 が仕切板にかかり、クエンチオイルの質量電荷密度を 1 nC/g として計算）からも明らかのように、漏洩後数秒で数十キロボルトに帯電する。仕切板の方が作業者に比べてその電位は大きいことがわかる。なお、このような高電位では必ず放電が起こるので、この場合も電位が上がり続けることはない。つまり、連続的にクエンチオイルから電荷が供給されているので、少なくとも仕切板が電氣的に先の時間だけ浮くことができれば、近傍にある接地金属に対して、それに近づく必要もなく簡単に放電を起こすことができる帯電電位であり、断続的に放電が起こっていたことが十分に推定できる。換言すれば、漏洩後、可燃性雰囲気であるかぎりいつでも着火可能な状態であった。なお、可燃性雰囲気形成のための酸素の供給は AOV の排気空気からも補充される。

以上のことから、仕切板からの放電が着火源の有力な候補として挙げることができる。

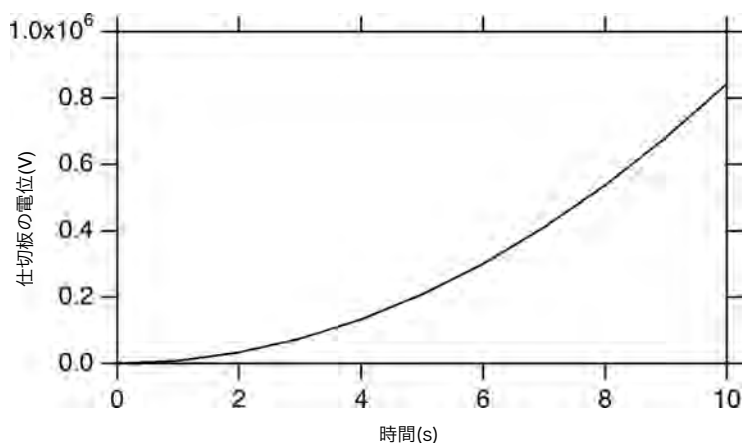


図 5-2 仕切板の帯電電位

## 5.2 高温物との接触による発火

聞き取り調査によれば、退避時にオイル噴出箇所であるクエンチフィッティング元弁の

後方から炎が立ち上がるのを見ている者がいる。周辺に高温物はないことから、この場合高温物による接触による発火は考えられない。

一方、中層階から火が見えたとの証言もある。この証言については、粘度の高いエンチオイルがくすぶりながら大量に 10 階から流れ落ち、中層階に溜まり（低層階は床が格子状（グレーチング構造）であるため、滞留できないが、6 階以上は床面がチェッカープレートと呼ばれる金属板であるため、オイルが落下しにくい構造である。ただし、6～9 階は一部にグレーチング床使用。）火災に至ったと考える可能性が高い。しかし、階下に流出したクエンチオイルや飛散したミストが高温部と接触して発火に至った可能性は完全に否定はできない。

## 6. 安全管理面からみた災害原因

本事故は、仕切板入替という作業からオイルの大量漏洩、実際に作業に関わっていた者 2 名のほか、階下で保温工事の作業をしていた作業員 2 名の計 4 名の死者がでるという大きな災害となった。単純な作業ミスと断定するのではなく、組織全体の安全管理の観点から災害原因を分析し、災害防止に資す必要がある。

### 6.1 人間的要因

#### (1) 作業監督者の危険意識の低下があった

発災当日の作業確認リスト（実施した項目を時間とともにチェックしていく方式のリスト）には、発災のために実際には行えなかった作業にチェックがなされていた。安全確認のためのチェックリストが形骸化しており、作業監督担当者の危険意識が低くなっていた。

### 6.2 設備的要因

#### (1) クエンチフィッティング元弁の切替スイッチが、仕切板のあるフランジ部近い位置にあった。また、施錠・カバーなどが施されていなかった。

発災したプラントの別の元弁では、スイッチが通常の作業では接触しづらい位置に設置してあったが、本クエンチフィッティング元弁は作業する仕切板と 50cm 以内に近接しており、作業中に人体や器具などと接触が可能な位置関係であった。にもかかわらず、カバーなどによる不用意な接触を防ぐ措置がなされていなかった。

#### (2) 作業空間に適切な避難経路がなかった

クエンチフィッティング元弁は 2F-208 の北端の角にあったが、唯一の避難経路となる階段は南側にあり、プラントの反対側に位置していた。また、作業エリア西側は配管でふさがっていた。クエンチオイルの噴き出したフランジ部より西側に位置していた作業員は、避難経路方向は噴出するオイルによって遮られ、他方は配管でふさがっており、逃げ場を無くしてしまったものと考えられる。

(3) 仕切板入替作業を必要とする元弁を使用していた

事故が発生した 2F・208 を除くプラントにも弁は使用されていたが、エスペロゲート弁とよばれるシール性の高い弁を用いていたため、デコーキング時にクエンチオイルの総液を停止するためには弁を閉止させればよく、仕切板入替作業が必要なかった。既設プラント設置から 10 年以上経過して設置された 2F・208 プラントでは、納期の関係でその弁は用いられず仕切板を用いることによってシール性に劣る弁の閉止能力をカバーしていた。

(4) プラント設計自体が生産重視で作業・作業者の安全を考慮していない。たとえば、AOV の元弁の位置が一連の作業として行えないような離れた位置にある。避難経路が一カ所しかない。通路が配管等で著しく狭いため作業がしにくく歩きにくい。

### 6.3 作業的要因

(1) 作業者が作業内容を変更していた

当該作業についての保全作業表ではチェンブロックは 2 本使用することになっていた。すなわち、1 本のチェンブロックで引き抜き、もう 1 本のチェンブロックで手元まで引き寄せることになっている。しかし、作業員によると最初のうちは 2 個使っていたが、1 個でできることが分かってからは、面倒なのでずっと 1 本でやっていたとの監督署の調査結果であった。作業手順の変更を監督者が管理しておらず、変更により発生する危険源の洗い出しを行うタイミングを逸した上、変更の保全作業表への反映がなされていなかった。

### 6.4 管理的要因

(1) 安全対策上重要な作業が基準化されていなかった

クエンチフィッティング元弁の切替スイッチに何かが接触したとしても、駆動用の空気が閉止されていれば元弁は作動しなかった。発災後に社内調査をしたところ、運転担当員の殆どの者が安全措置として閉止操作を行っていたという結果がでた。しかし、その措置が基準化されておらず、措置は運転担当者個々人の意識に任されていた。

(2) 安全管理組織に欠陥があった

仕切板入換作業を含むデコーキング作業をはじめに行うときに、クエンチフィッティング元弁の施錠が工事担当 G、保全担当 G、協力会社の 3 者による工事打合会で取り決められた。工事担当 G が作成する『工事安全指示書（安全措置事項が記載されている）』は施錠が記載されたが、保全担当 G から運転担当 G へ情報が伝達されず、運転担当 G の作成する『作業確認リスト（作業のチェックリスト）』には反映されなかった。また、工事安全指示書の具体的実施をフローシートにした安全養生図には記載が漏れており、結局は工事打合

会での取り決めが実際の作業での安全確認に反映されなかった（図 7-1）。

(3) 危険情報の水平展開が全社に渡るシステムになっていなかった

会社全体で弁の作動に関するヒヤリハット事例は 15 件（資料 A）あり，うち作業員の肩があたった，など意図せずにレバーや操作スイッチに触れてプロセスに変動を与えたケースが複数ある。しかしいずれも保安安全に影響した事例はないという理由で，対応は発生した課内にのみとどまっていた。

(4) 事業所・協力会社との安全管理の連携がなかった

発災箇所周辺は機器等に防爆構造のものを使用していることから，ゾーン 1 あるいはゾーン 2 の危険場所と認識されていたと考えられる。社員が静電靴を履き帯電防止の措置をとっていたにもかかわらず，協力会社の社員は非静電靴を自ら準備して着用していたことから，事業所と協力会社の間での作業の危険性に対する認識が一致していない，あるいは情報の伝達されていなかった。

(5) 同時に行う別作業の管理が不徹底であった

発災時，同プラントでは仕切板抜き取り作業の他に，階下で保温断熱工事が行われていた。保温断熱工事は安全帯を用いて作業していたため，クエンチオイルが漏洩した場合には避難が遅れる。また，保温断熱工事で持ち込まれていた電動工具によってクエンチオイルが着火する可能性がある。クエンチオイル漏洩の危険性がある作業を行うに当たって，影響が及ぶ別作業についての周知・管理がなされていなかった。そのため，保温断熱工事の作業員が避難できなかった。

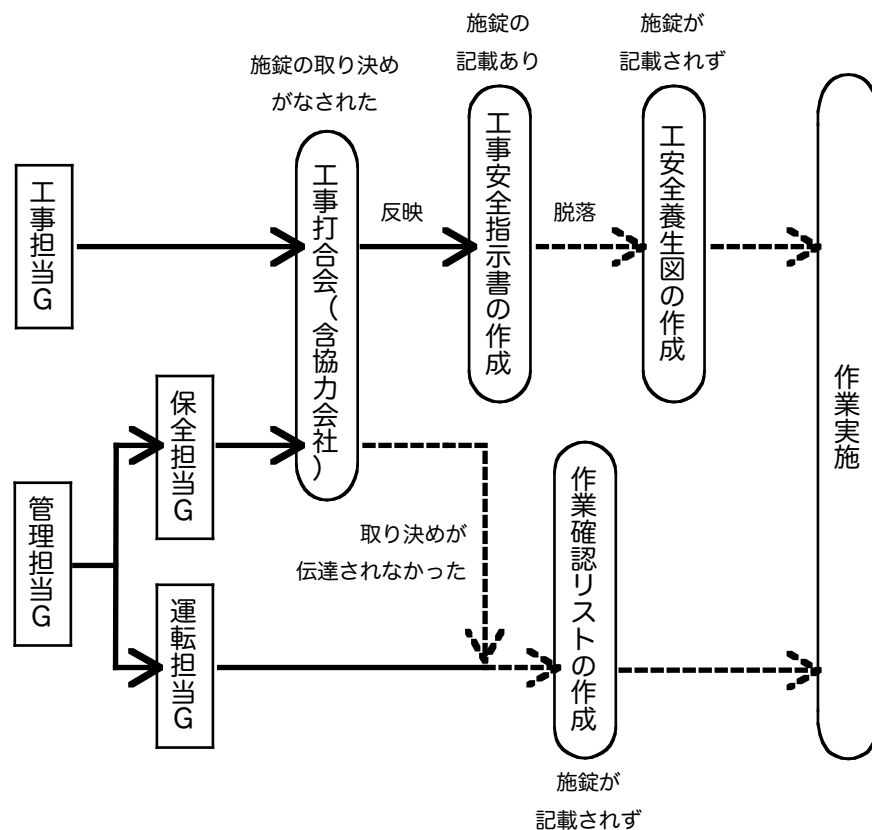


図 6-1 作業の流れ

## 7. 再発防止対策

現状での火災発生原因の推定では、着火源を特定するには至らないが、いくつかの原因が想定された。事故の再発防止対策として、これらの可能性の排除および、設備面・安全管理面からクエンチオイル漏洩を防ぐ対策、また仮に漏洩した場合に被害の拡大を抑制する措置が求められる。

### (1) クエンチオイル元弁の意図しない作動の防止

例えば、作業前には弁を施錠する、あるいは保護カバーをつける、駆動用の空気元弁を閉める、あるいは設備のレイアウトを変更するなどして意図しない弁の開閉が行われないような措置を施す。

### (2) 作業者の接地と帯電防止作業服の着用

静電靴の使用：本災害では静電靴でも効果は期待できないほどの電荷が発生したと考えられるが、ごく少量の漏洩では静電靴の効果はあるため、協力会社の社員についても作業者は静電靴および帯電防止作業服を着用する\*。

高温箇所の保護：漏洩したオイル等が直接触れないよう、高温の箇所を保護する

＊：労働安全衛規則第二百八十六条の二

事業者は、第二百八十条及び第二百八十一条の箇所ならびに第二百八十二条の場所において作業を行うときは、当該作業に従事する労働者に静電気帯電防止作業服及び静電気帯電防止用作業靴を着用させる等労働者の身体、作業服等に帯電する静電気を除去するための措置を講じなければならない。

### (3) オイル漏洩が拡大しないような措置

クエンチオイルは 2F・202～208 に共用として供給されており、設備の冷却を継続的に行わなければならないため、安全確認後に手動で停止する。本災害ではオイルポンプ停止までに時間が掛かり、漏洩が継続した。プラント各基毎に弁・インターロックをもうけるなど、発災したプラントを緊急に隔離できるような対策を取る。

使用状況が把握できる共用設備の一般的な管理対策も必要である。

### (4) 事業所内の緊急対応計画の見直し

発災時は避難路が1箇所しかなく、作業場から炉を挟んだ反対側にあった。作業は避難経路が確保できる場所で行うようにする。また、災害時にプラント内で作業している協力会社を含めた全ての作業員に迅速に緊急連絡が伝達できるようなシステムをつくる。

### (5) 円滑で漏れのない情報伝達ができる組織作り

事前の打ち合わせや危険情報などが必要な作業者に適切に伝達されるような体制を整備する。

### (6) 適切な工事管理

同時に複数の工事がある場合には、互いに影響を及ぼす可能性について適切なリスクアセスメントを行う。

また、協力会社に作業を委託する場合には、発注会社と同様の安全レベルで作業できるような管理を行う。

### (7) 組織の高い安全意識の醸成

本災害は

- ・ 取り決められていた措置にも関わらず、実施されなかった（クエンチフィッティング元弁施錠）

- ・ 一部の作業員は認識していたが全員に周知されていなかった，基準化されていなかった（クエンチフィッティング元弁駆動用空気元弁閉止）
- ・ 作業確認チェックリストが安全性の確認として使われず形骸化していた（行っていないはずの作業にチェック）

など，組織の構成員それぞれの低い危機意識によって発生したとも言える。危険源は何処にあるかわからず，対応してもその対応によって新たな危険源が生まれる可能性がある。安全な運転・保全作業を目指して常に改善を続けようとする強い意志（安全文化）を組織全体で醸成させる必要がある。