

消防庁長官賞

特定屋外貯蔵タンクの破損事故からの提言
～Fault Tree Analysis (FTA) による
事故原因究明のすすめ～堺市消防局 危険物保安課 大野山 翔二
西消防署 阪口 勝

1 はじめに

総務省消防庁の統計によると危険物施設の事故は高い水準で横ばいの状況が続いており、事故原因は様々な物的要因や人的要因に起因している。本件は管内の特定事業所において人的要因（維持管理不十分）により屋外貯蔵タンク内が負圧となり発生した破損事故である。当該タンク内が負圧となった直接的な原因は早期に特定することができたが、直接原因を引き起こした間接的な原因を特定することに苦慮した案件であった。

本論文では、事故原因を究明することで得られた再発防止策とともに、原因の特定が困難な事案に対する包括的な解析ツールとしてのFTAの有用性について提言する。

2 事故の概要

(1) 発災事業所の概要

発災事業所は堺市消防局管内に所在する堺泉北臨海特別防災区域内にあるA株式会社堺事業所（以下「当該事業所」という。）である。敷地面積は1,246,720㎡で石油コンビナート等災害防止法上の第1種事業所、高圧ガス保安法上の第1種製造所に該当する。当該事業所は屋外タンク貯蔵所105施設をはじめとする危険物施設を計144施設保有しており、管内を代表する大規模な事業所である。

(2) 発災施設の概要

発災施設（以下「本件タンク」という。）の概要を表1に示す。

表1 本件タンクの概要

施設区分	特定屋外タンク貯蔵所
設置許可年月	昭和42年8月
完成検査年月	昭和43年7月
貯蔵物	危険物第4類第3石油類 重油（C重油）
タンク規模及び容量	内径29.06m、高さ16.459m、容量8,830kL （指定数量の倍数：4,415倍、許可液面高さ：13.43m）
タンクの材質	ア 底板：SS400（9mm） イ アニュラ板：SM-400C（12mm） ウ 側板：SS41（1段目19mm、2段目17mm、3段目15mm、4段目13mm、5段目11mm、6段目9mm、7～9段目7mm） エ 屋根板（コーンルーフ）：SS41・SS400（4.5mm）
付属設備	ア 保温材：有り イ 加熱設備：スチームコイル（液温60℃） ウ 通気管：無弁通気管4箇所（内径200mm）、引火防止網（40メッシュ）
設計最大流速（払出し）	1,300kL/h

(3) 発災時の気象状況

天候：晴れ、風向き：北西、風速：3m/秒、気温：22℃

(4) 発災時の状況等

令和5年3月某日、本件タンクから船舶2艇へ流速660kL/hで重油を出荷中に、本件タンクに隣接する屋外タンク貯蔵所付近で作業をしていた協力会社の社員が、鉄板が弾むような音に気づき周辺を確認したところ、本件タンクの側板上部に変形を発見した。人的被害は無し。物的被害はタンク側板の破損であり、危険物の漏洩はなかった。事故の時系列は表2のとおり。

表2 事故の時系列

時刻	内容
8時55分	船舶Aへ60kL/hの流速での出荷開始
10時30分	当該事業所の従業員が本件タンク周辺のパトロールを実施し、タンクの変形等の異常が無いことを確認
10時39分	船舶Bへ600kL/hの流速で出荷開始
11時50分	協力会社の従業員が異音に気づき周辺を確認したところ、本件タンクの側板に変形を発見し、当該事業所へ連絡
11時51分	船舶A及び船舶Bへの出荷作業を停止 当該事業所の従業員が現場を確認し、本件タンクの側板の変形を確認 ※発災時の液面高さは5.611mであり貯蔵量は3,649kLであった
13時35分	消防機関へ通報
15時53分	消防職員より現地で緊急使用停止命令（消防法第12条の3第1項）を口頭にて発令

(5) 発災後のタンク各部位の状況

ア 側板

目視により本件タンクの側板を確認した結果、側板上部の保温材が施工されていない部分（7～9段目）を中心に、8箇所で変形（凹み）が認められた。各変形箇所の範囲、凹み深さを図1に示す。

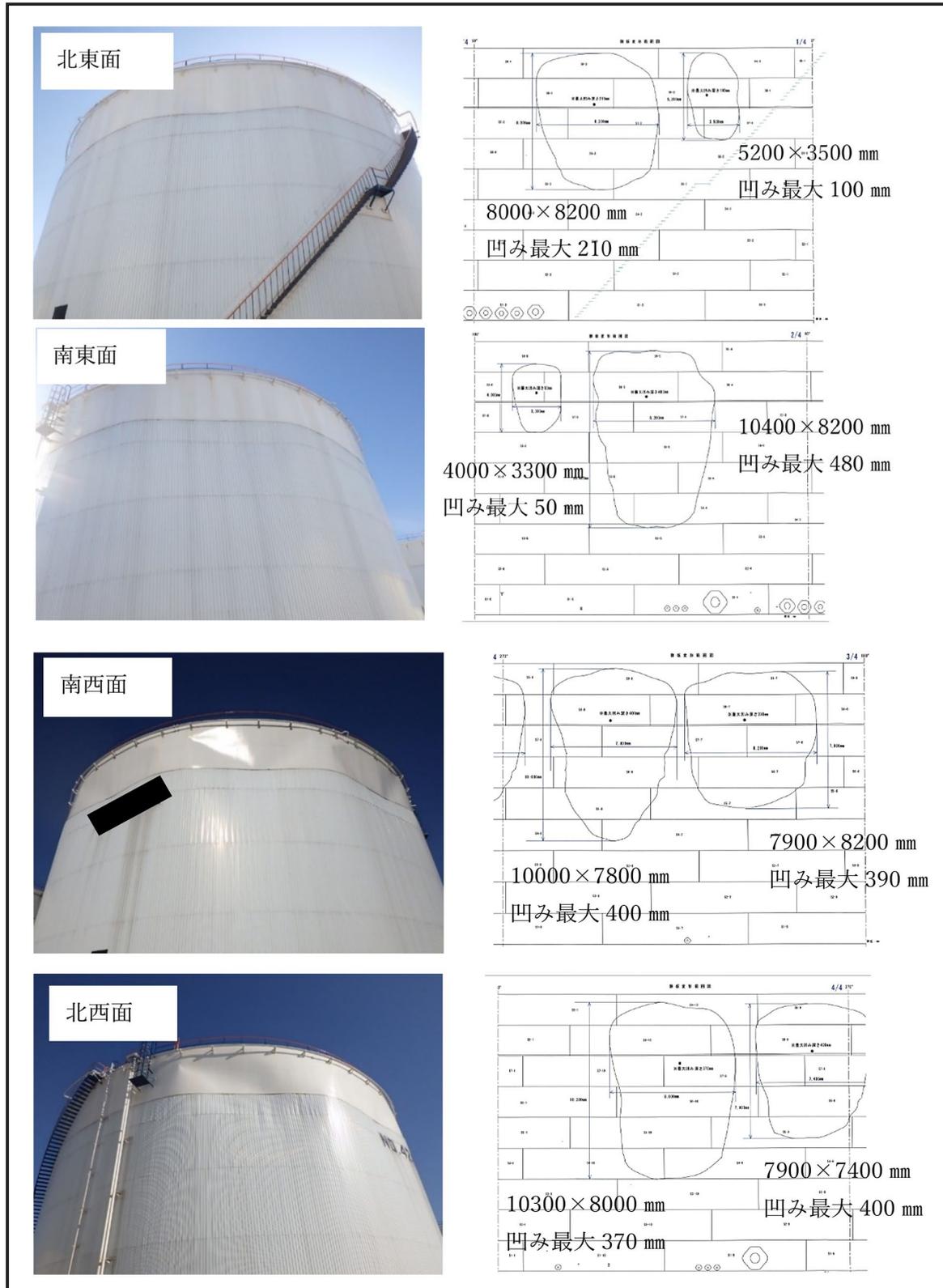


図1 側板の変形状況

イ 無弁通気管及び引火防止網

全4箇所の無弁通気管のノズル部には、流路を阻害するような閉塞は認められなかった。

一方、無弁通気管の出入口に取り付けられている引火防止網（40メッシュ）は、無弁通気管から取り外して目視により確認した結果、4箇所全てにおいてスケール（ゴミ等の汚れ）が網のほぼ全面に付着していることが認められ、無弁通気管の出入口下部の屋根板にもスケールが付着していた（図2参照）。



図2 引火防止網の状況（4箇所とも同様の目詰まり）

ウ その他の構造・設備

本件タンクの内外側から屋根板、アニュラ板及び底板（溶接部を含む）を目視により確認した結果、変形等の異常は認められなかった。同様に基礎・地盤についても目視で確認した結果、異常は認められなかった。また、泡消火設備、散水設備等の設備についても確認の結果、異常は認められなかった。

(6) 本件タンクの点検履歴

ア 直近のタンク内部点検

令和元年11月に内部点検（危険物の規制に関する規則第62条の5）を実施し、本件タンク本体の強度に問題がないことが確認されている。

イ 直近の引火防止網の点検履歴

引火防止網の点検は年に5回実施されている。年5回の点検のうち1回は協力会社に委託して行う点検である。直近の点検履歴は表3のとおり。

表3 点検履歴

点検年月日	点検結果	点検実施者
令和4年3月	損傷、目詰まり、腐食なし（4箇所の引火防止網全て）	当該事業所従業員
令和4年6月	損傷、目詰まり、腐食なし（4箇所の引火防止網全て）	当該事業所従業員
令和4年9月	損傷、目詰まり、腐食なし（4箇所の引火防止網全て）	当該事業所従業員
令和4年10月	10～50%程度の目詰まり（4箇所の引火防止網全て）※	協力会社従業員
令和4年12月	損傷、目詰まり、腐食なし（4箇所の引火防止網全て）	当該事業所従業員

※令和4年10月に実施された協力会社従業員による点検では、点検後に清掃が行われた結果0～10%程度の目詰まりに改善している。

3 原因究明の問題点と課題及びFTAについて

(1) 原因究明の問題点と課題

当初の事故現場の見分から、引火防止網の閉塞が直接的な原因でタンク内が負圧となり側板が変形したことが推定できた。一方、引火防止網が閉塞した間接的な原因を推定することは困難であった。その理由として、引火防止網が閉塞する可能性のある原因事象が複数確認されたこと及びその複数の原因事象が組み合わさった結果、引火防止網の閉塞を引き起こした可能性があることが挙げられる。さらに、本件タンクの法定点検（消防法第14条の3の2）や自主点検は定期的実施しており、維持管理が適切に行われているように見受けられたことも間接的な原因の推定を困難にさせた。

また、間接的な原因が組織のセクショナリズムや作業のマンネリ化などに起因する事故であった場合、事故原因を詳細まで究明し、自主保安体制の的確な改善指導を図ることが消防機関の責務であると考えた。

以上のことから、FTAを用いた詳細な原因解析を試みることにした。

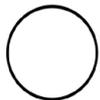
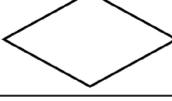
(2) FTAについて

FTA (Fault Tree Analysis : 故障の木解析) はもともとアメリカ空軍において、ミサイルの潜在的な問題点を解明し、そのシステムの安全性を予測し評価するために開発された解析手法である。FTAにより事故の原因解析を行えば、事故に関係する要因の見落としが少なくなり、思考が演繹的に進められて、要因間の支配条件が明確になるなどのメリットがある。また、消防庁が発出している「危険物流出等の事故の調査マニュアルについて（平成20年8月12日付け消防危第317号）」等においても事故原因を特定するための手段として示されている。

FTAは、解析対象とする事象をまず設定し、その事象を出現させる要因を洗い出していく解析手法である。具体的には解析したい事故を最上段に記述し、ANDゲート又はORゲートの記号を用いてすべての一次的な要因事象を抽出する。一次的要因事象に対してさらに二次的要因事象を抽出し、これを繰り返すことでそれ以上展開できない基本事象等まで掘り下げたFT（フォルトツリー）を作成する。その後、掘り下げた基本事象を解析することで、事故を引き起こした事象の最小の組み合わせを求めることができる。

FTAで使用する記号を表4に示す。

表4 FTAで使用する記号

記号	記号の意味
	ANDゲート 下方に存在する事象がすべて成立した時に上位事象が成立する
	ORゲート 下方に存在する事象のうち、いずれか一つが成立する時に上位事象が成立する
	頂上事象・中間事象 頂上の事象ないし中間の事象
	基本事象 これ以上分解できない事象
	外部事象 システム外部のインターフェース条件又は外部環境事象
	末端事象 それ以上の展開は意味がないため意図的に中断した事象

4 FT (フォルトツリー) の作成方針

FTを作成するにあたり、次の方針に基づき作成を行った

(1) 複数の職員で要因事象を抽出する

要因事象の抽出を行うプロセスにおいて、より多くの事象に分解することが肝要となることから、当局内で様々な役職や経験を有する複数の職員の視点から要因事象の抽出を行った。具体的には、特定屋外タンク貯蔵所等の技術基準に詳しい職員、当該事故の原因調査において事業所へのヒアリングを担当した職員、危険物施設等の過去の事故事例に詳しい職員及び固定概念が少ない危険物規制事務1年未満の職員でFTの作成チームを構成した。これらの者から様々な視点の情報を取り込み、漏れがないように要因事象の抽出を行うこととした。

(2) FTの編集者を1名とする

前述したチームでFTを作成するにあたり、演繹的思考で論理的にFTを構築する必要がある。複数人による要因事象の抽出のデメリットは、数多く挙げられた意見の收拾がつかなくなることだと考え、FTの編集者を1名とした。編集者はチーム内で出た様々な意見を集約し、FTに係る骨子の作成、途中の修正及び最終の完成までを単独で行った。

(3) 事業所のFTを作成させる

既述のとおりFTの作成には複数の視点による要因事象の抽出が求められる。このことから消防目線のFTだけでなく、事業所目線でのFTの作成を依頼し、消防が作成したFTと合成させることで最終的なFTを完成させた。

5 直接的な原因の解析 (FTA)

FTの作成方針に則り「タンク側板の変形」を頂上事象としたFTを完成させた。完成したFTを用いて直接原因に係るFTAを展開する(図3参照)。

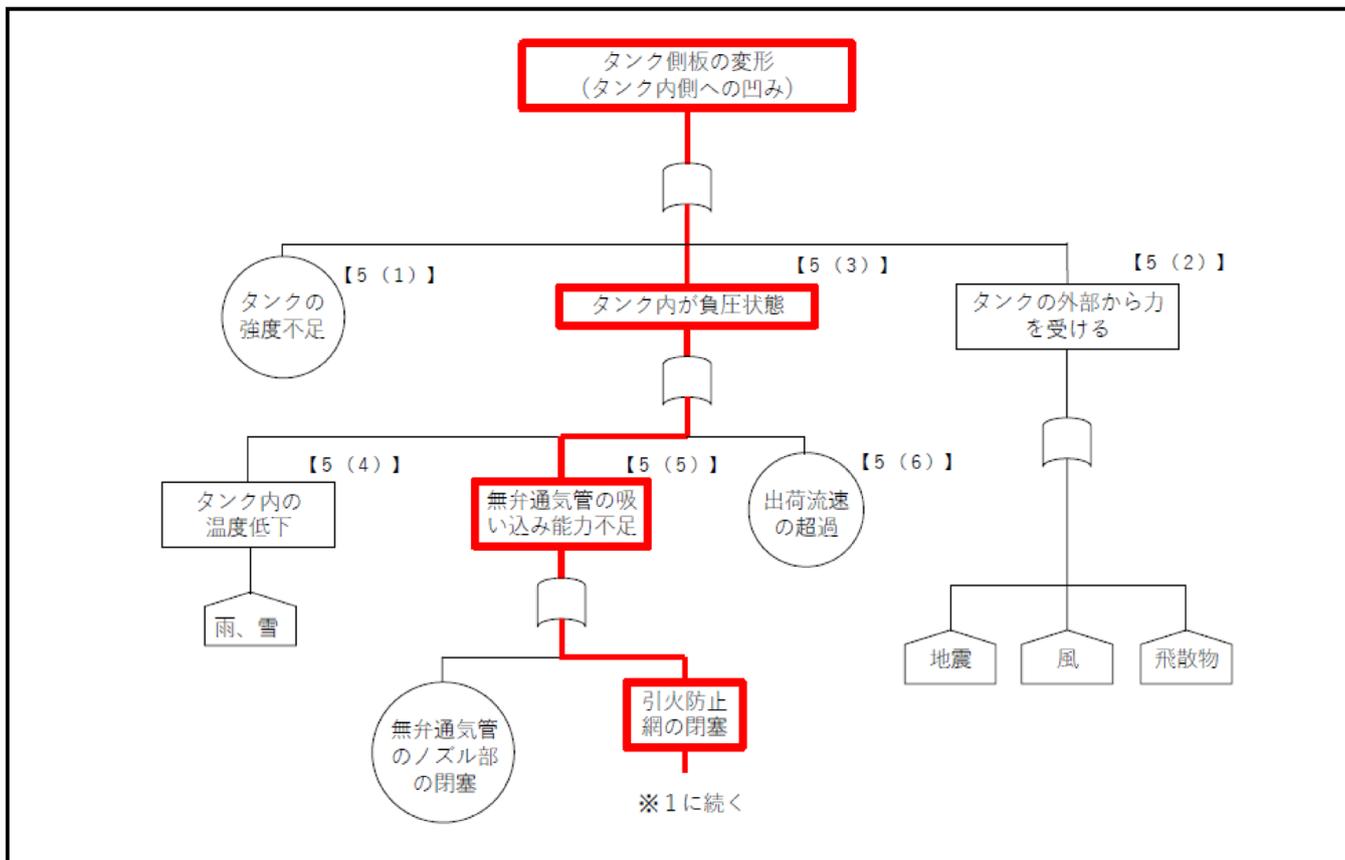


図3 FT①

(1) タンクの強度不足

本件タンクは令和元年11月に内部点検を実施しており、その際にタンク本体の強度に問題はないことが確認されているため、タンクの強度不足が原因ではないと認められる。

(2) タンクの外部から力を受ける

当該事業所の地震計及び風速計より、事故発生時、本件タンクの設置場所で地震及び強風は発生していない。また、現地調査の結果、本件タンク外面に目立った傷はなく、また周辺に飛散物も確認されていない。よって、タンクの外部からの力が原因ではないと認められる。

(3) タンク内が負圧状態

ヒアリング結果より、当該事業所の従業員が事故発生後、側板の変形が負圧によるものと判断し、本件タンクの屋根マンホールを開放した際に、タンク内が負圧状態であったことを確認している。

(4) タンク内の温度低下

当日の天候は晴れで、本件タンク内の温度を低下させる要因となるような降雨、降雪は無かったことから、タンク内の温度低下が原因ではないと認められる。

(5) 無弁通気管の吸い込み能力不足

現地調査結果より、全4箇所の無弁通気管のノズル部には流路を阻害するような閉塞は認められておらず、ノズル部の閉塞が原因ではないと認められる。

一方、無弁通気管の出入口に取り付けられている引火防止網(40メッシュ)を取り外して目視により確認した結果、4箇所全てにおいてスケールが網のほぼ全面に付着していることを確認している。よって、スケールによる引火防止網の閉塞が無弁通気管の吸い込み能力を不足させた原因であると認められる。

(6) 出荷流速の超過

事故発生時の出荷流量計の指示値は660kL/hであり、無弁通気管の設計流速(1,300kL/h)内であった。また、出荷量の設定値と実流量の偏差アラームの鳴動履歴は無く、一時的な流量の超過も無かった。このことから、出荷流速の超過が側板の変形した原因ではないと認められる。

以上のことから、タンク側板の変形に係る直接的な原因は次のとおりであると判断した。

本件タンクはスケールにより引火防止網が閉塞したことで、無弁通気管の吸い込み能力が低減し、本件タンクからの払い出し流量に対して十分な通気量が確保できなくなった。その結果タンク内が負圧状態となり、タンクの側板がタンクの内側に向かって変形した。

6 間接的な原因の解析 (FTA)

タンク側板の変形に係る直接的な原因は、引火防止網の閉塞であると判断できた。次に、引火防止網の閉塞の背景にひそむ間接的な原因をさらに解析することとし、「引火防止網の閉塞」を頂上事象としたFTAをさらに展開した(図4参照)。

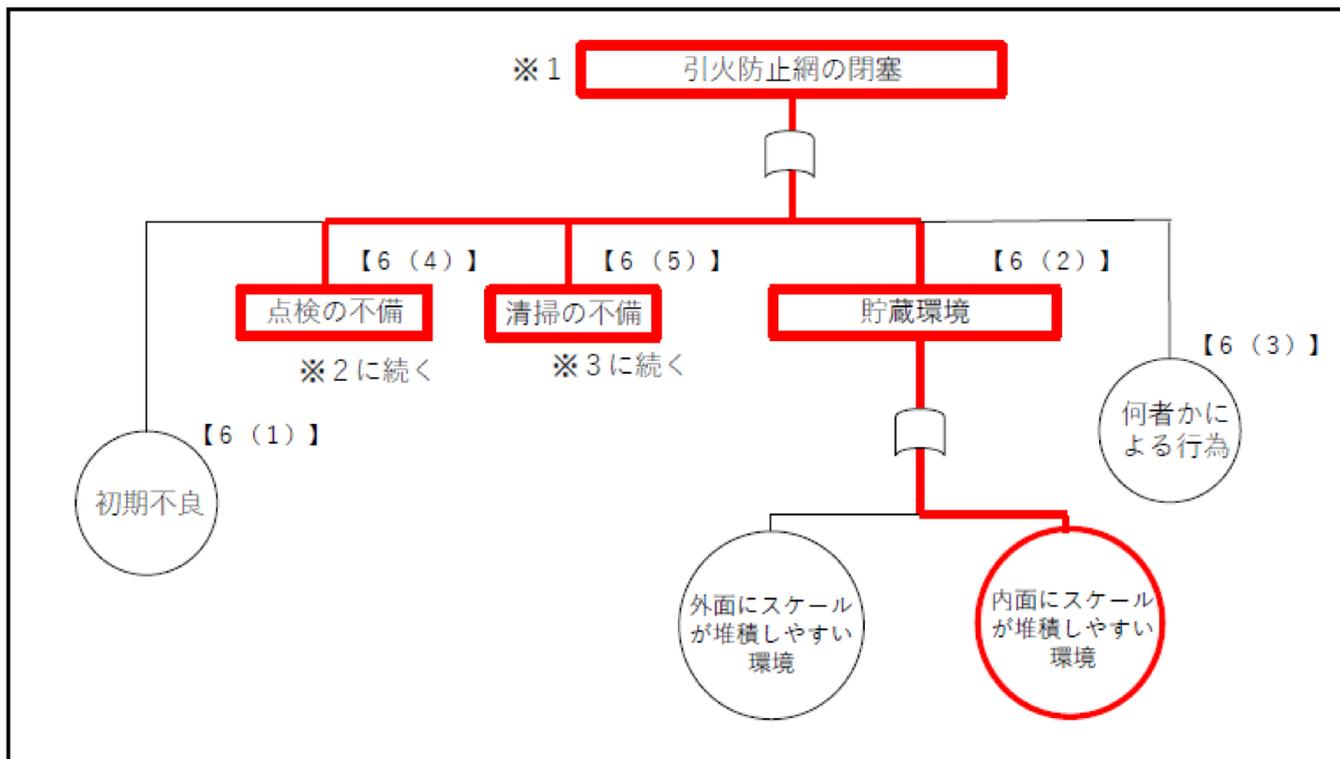


図4 FT②

(1) 初期不良

ヒアリング結果より、引火防止網が納入された際には品物の状態を確認し、受領印を押印して受け入れており、検品は適切に行われていることから、引火防止網の初期不良は無かったものと認められる。

(2) 貯蔵環境

当該事業所の調査により、引火防止網に付着していた物質は、本件タンク内部の貯蔵物(C重油)に由来する炭素を主成分とするものであると認められ、引火防止網の外面の環境に起因する物質が閉塞に関係したものではないと認められる。また、本件タンクと同様にC重油を60℃で貯蔵している類似のタンクの現地調査において、清掃後1ヶ月から2ヶ月程度で目詰まりが発生している網が確認されている。

よって、貯蔵温度やC重油の性状等の要素の影響が相まって、本件タンク内の貯蔵環境はスケールが発生しやすい環境であったと考えられる。

(3) 何者かによる行為

引火防止網の閉塞状況を確認したところ、閉塞に至るまでにはある程度の期間が必要であると考えられ、何者かがある程度の期間をかけて引火防止網を閉塞させることは考えにくい。また、当該事業所の構内は定期的に巡回点検が実施されていることから、何者かによる行為が閉塞の原因ではないと考えられる。

(4) 点検の不備

法定点検及び自主点検記録より、定期的に点検が実施されていることから、点検未実施が引火防止網の閉塞の原因ではないと認められる。一方、点検不十分が引火防止網の閉塞の原因の一つと考えられることから、さらに詳細を考察する(図5参照)。

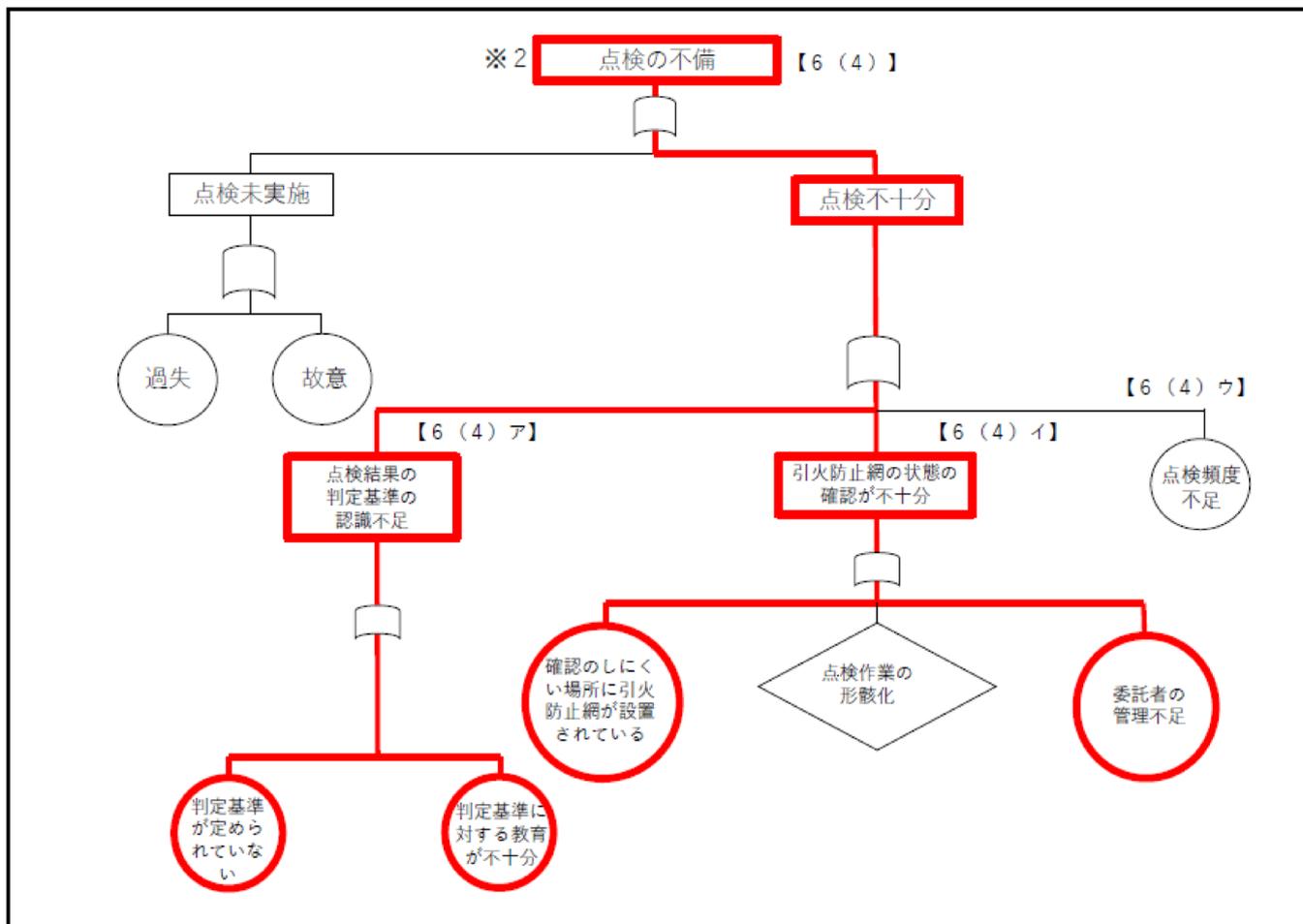


図5 FT③

ア 点検結果の判定基準の認識不足

ヒアリング結果より、点検の結果、引火防止網の汚れがひどいと判断した場合は、引火防止網を取り外して清掃をするとされているが、点検の手順書には点検結果の判定基準（清掃の必要性を判定する基準）は定められておらず、判定が属人的になっていたと認められる。また、点検の判定基準が定められていないため、教育の対象が存在しない。

よって、点検結果の判定基準の認識が不足していた可能性が考えられる。

イ 引火防止網の状態の確認が不十分

今回の調査においては、点検作業の形骸化について判断するための十分な根拠を得ることができなかった。一方、ヒアリングより点検では引火防止網を取り外さず通気管を下から覗き込む状態で引火防止網を確認しており、確認のしにくい場所に引火防止網が設置されていたと認められる。また、協力会社による点検の結果の判定は協力会社の監督者が行っており、当該事業所の従業員は引火防止網を確認していない。

よって、引火防止網の状態の確認が不十分であったと考えられる。

ウ 点検頻度不足

法定点検及び自主点検記録に、当該事業所による点検及び協力会社による点検の記録が残されており、規定どおりの頻度で点検は実施されていたと認められる。

(5) 清掃の不備

点検結果報告書やヒアリング結果より、引火防止網の清掃は実施されていることから、清掃未実施が引火防止網の閉塞の原因ではないと認められる。一方、清掃不十分が引火防止網の閉塞の原因の一つと考えられることから、さらに詳細を考察する(図6参照)。

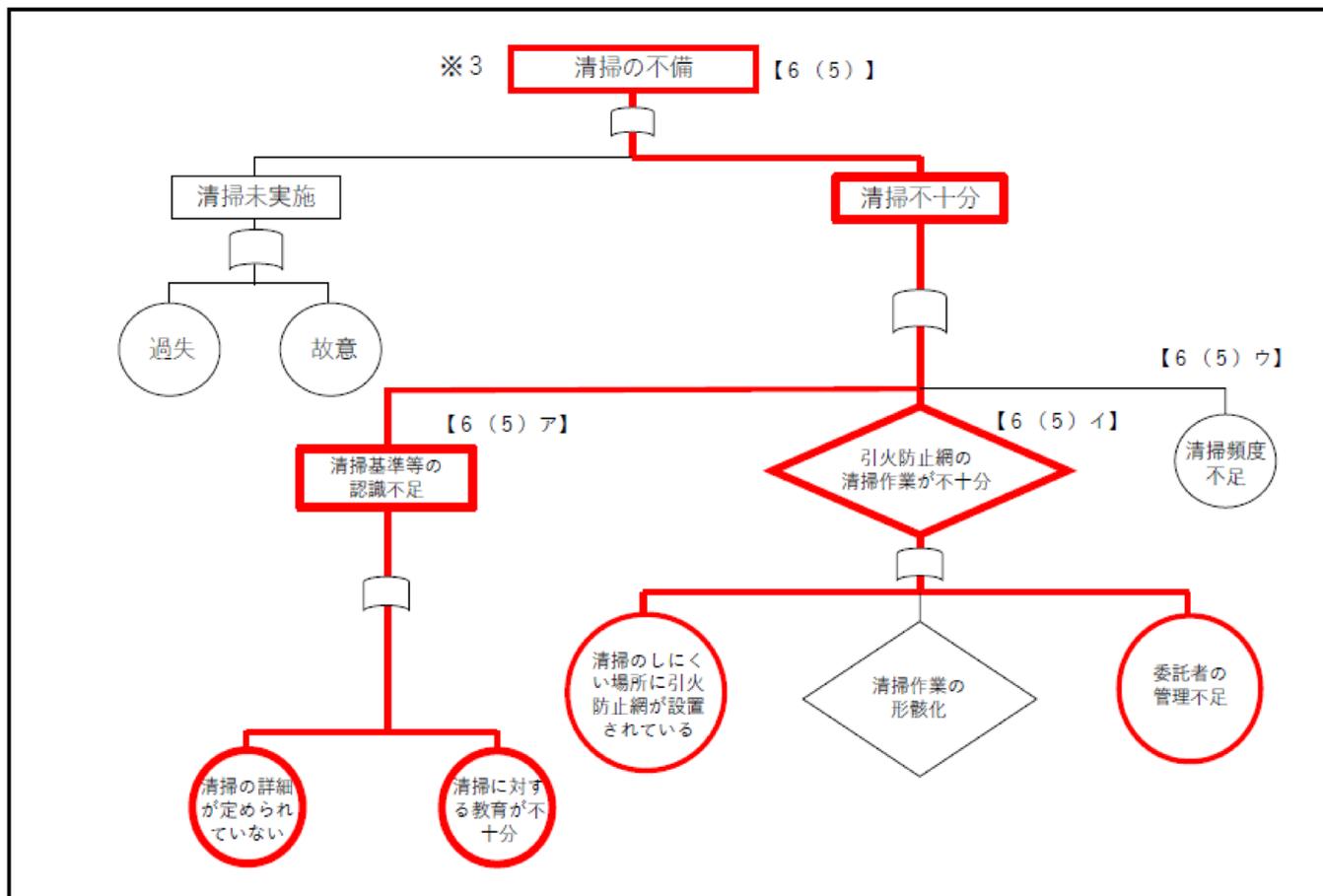


図6 FT④

ア 清掃基準等の認識不足

6(4)アと同様に、清掃の詳細(清掃後の詰まり状況の判定基準等)が定められておらず、判定が属人的になっていたと認められる。また、清掃の詳細が定められていないため、教育の対象が存在しない。よって、清掃基準等の認識が不足していた可能性が考えられる。

イ 引火防止網の清掃作業が不十分

6(4)イと同様に、引火防止網の清掃作業が不十分であったと推定される。

ウ 清掃頻度不足

6(4)アのとおり、点検の手順書に点検結果の判定基準(清掃の必要性を判定する基準)は規定されておらず、清掃頻度そのものが定められていない。よって、清掃頻度が不足していたかどうかを判断するには至らなかった。

以上のことから、直接原因である引火防止網の閉塞を引き起こした間接的な原因は、引火防止網の内面にスケールが堆積しやすい貯蔵環境であったこと及び引火防止網の点検が不十分又は清掃が不十分であったことであると判断した。

また、引火防止網の点検が不十分又は清掃が不十分となった原因は次のとおりである。

- ・点検及び清掃のしにくい場所に引火防止網が設置されている。
- ・点検及び清掃の委託者による受託者（実施者）の管理不足。
- ・点検結果の判定基準及び清掃の詳細が定められていない。
- ・点検結果の判定基準及び清掃に対する教育が不十分。

7 再発防止策

タンク側板の変形に係る直接的な原因は、引火防止網の閉塞であると判断できた。次に、引火防止網の閉塞の背景にひそむ間接的な原因をさらに解析することとし、「引火防止網の閉塞」を頂上事象としたFTAをさらに展開した（図4参照）。

FTAにより導き出した事故原因に基づき当該事業所に対して次の指導を行った。

- (1) タンクごとの貯蔵環境を鑑み、引火防止網の詰まりやすさを把握すること。
- (2) 通気管の点検・清掃が容易に行える状況を整えること。
- (3) 委託者による受託者の業務管理を適切に行うこと。
- (4) 点検の判定基準及び清掃基準等を定めるとともに継続的に教育を実施すること。

8 FTAの有用性についての提言

最後に、今回の事故原因調査を行うことによって得られたFTAの有用性として、次の3点を提言する。

（提言1）

FTAは的確な再発防止策を導き出せるだけでなく、ヒアリング等の調査と並行して行うことにより調査すべき内容が明確化され、効率的に事故原因調査を進めることができる。

（提言2）

FTの作成により要因事象を抽出してノウハウを蓄積しておくことは、同様の事故が発生した場合に活用することができるだけでなく、調査の初動対応を迅速化することが可能である。

（提言3）

FTAにより「起きた事象」に対して再発防止策を策定できるだけでなく、「起きなかった事象」や「起きてもおかしくなかった事象」へ対策が講じられているかの検証が可能となり、より深甚な調査が可能となる。

危険物施設に係る事故は人的要因、物的要因にかかわらず、複数の要因が組み合わさって発生することが多い。また、時代とともに危険物施設が多様化する中で、事故原因も複雑化している。本論文が全国で発生する危険物施設の事故防止の一助となることを切に願う。

○参考文献

- ・総務省消防庁特殊災害室. 「石油コンビナートの防災アセスメント指針」. H25
- ・大関 親. 「新しい時代の安全管理のすべて」. 中央労働災害防止協会. H23
- ・総務省消防庁危険物保安室. 「危険物流出等の事故の調査マニュアル」. H20
- ・厚生労働省安全課. 「化学プラントのセーフティ・アセスメント」. 中央労働災害防止協会. H13