

英国ミルフォードヘブン市アモコ製油所 ボイルオーバー事故の考察

A lesson learned from “Crude Oil Tank Fire Accompanied by Boilover at Amoco Refinery in 1983”

夏目 泰忠¹⁾・古積 博²⁾・坂本 尚史³⁾

Yasutada NATSUME, Hiroshi KOSEKI and Takabumi SAKAMOTO

1983年に英国ミルフォードヘブン市アモコ製油所で発生した、ボイルオーバーを伴った原油タンク火災は、詳細な記録が残る貴重な事例である。

このたび、記録を詳細に考察し、他の事例や日本の状況と比較することにより、ボイルオーバー発生時の油飛散範囲、放射熱強度の影響、現場での的確な指揮の難しさ等、原油タンク火災独特の消火活動の困難さについて改めて知見を整理した。これらを提言としてまとめるとともに、危機的状況の中で指揮者を支援する「防災支援システム」を提案した。

1. はじめに

石油タンク火災の中でもボイルオーバーを伴ったものは被害が甚大となる。ボイルオーバーとは、タンク火災において、燃料が高温となるが、タンク底部に存在する水に触れてその水が沸騰、一種の爆発が起こる現象である。原油等の重質留分を含む沸点範囲の広い油が長時間燃焼すると、燃料層中に高温層(ホットゾーン, Hot zone)が形成され、その高温層が徐々に降下してタンク底部に存在する水に触れ熱交換が起こり、そのため、水が突沸する。その結果、燃焼している高温の油の泡状飛沫が広範囲に飛び散り、消防隊員を巻き込むばかりか連鎖的に隣接のタンクや設備に火災がおよび、通常はタンク一基の火災では終わらず、事業所等に壊滅的被害をおよぼす¹⁾²⁾³⁾。また、ファイアボール(火球)を伴う爆発的燃焼

が起こり、その強い放射熱によって消防隊員や近傍にいる関係者が被災する⁴⁾。

このような、主に原油の火災に伴うボイルオーバー現象についてはかなり研究され、その発生メカニズムは理論的にはある程度解明されているといっている^{5)~12)}。

一方、消防活動という現場の実務を行う上では、大型原油タンクの火災は世界的に見ても事例が少ないことと、公表された記録がほとんどないこともあって、整理、解明しておくべき事項が多い。1983年に英国ミルフォードヘブン市(Milford Haven, UK)アモコ製油所(Amoco Refinery)における大型原油タンクの火災に伴って発生したボイルオーバーは、過去最大で世界的にも知られた事例であり、現場での消防活動上参考となることが多い希少な事例である。

筆者は、1999年に当事故の際に消火活動の指揮を執った、Mid & West Wales Fire Brigade, Area Commander, Mike H. George氏を訪問し、詳細な事故報告書とビデオテープ記録を入手することができ、また、消火活動時の問題点などを質問する機会を得た。やや旧聞に属するとは思われるが、本報告書は日本に詳細が紹介されたことはなく、この報告書によれば、ボイルオーバーが発生した際、いかに現場が混乱したかがよく理解できる。

今後想定されている大規模地震の際には、大規模タンク火災とそれに伴うボイルオーバーの発生が懸念されるが、そのような危機的状態の際の対応方法として参考に

連絡先：坂本尚史 tsakamoto@cis.ac.jp

1) 千葉科学大学危機管理学部環境危機管理学科
Department of Environmental Risk and Crisis Management,
Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba
Institute of Science

2) 千葉科学大学 客員教授
Visiting Professor, Chiba Institute of Science.

3) 千葉科学大学 研究員
Researcher, Chiba Institute of Science
(2015年9月29日受付, 2016年1月6日受理)

なると思われる。ここに氏の許可を得てこの報告書を翻訳して考察するとともに、氏との面談から得た教訓も併せて紹介し、大型タンク火災の消火活動の参考に供したい。

2. アモコ製油所火災の概要4)

2. 1 火災発生日時

1983年8月30日(火)10時45分

2. 2 出動要請日時

1983年8月30日10時53分

2. 3 事故発生場所

英国ミルフォードヘブン市アモコ製油所011番タンク

2. 4 事業所規模

精製能力500万トン/年(10万バレル/日)

2. 5 使用消防機材数量

- | | | |
|-----------------|-----------------------------------|-------|
| (1) ポンプ車 | ダイフェッド(Dyfed County Fire Brigade) | |
| 消防本部他4消防隊 | | 合計44台 |
| (2) 高所放水車 | ダイフェッド県消防本部他4消防隊 | |
| | | 合計6台 |
| (3) 泡放射砲積載車 | 9消防隊 | 合計14台 |
| (4) その他消防車両 | 4消防隊 | 合計5台 |
| (5) 給水車、泡輸送車その他 | | 合計66台 |

2. 6 出火タンク(011番タンク)仕様

(1) 諸元

タイプ	浮屋根式
高さ	20m
直径	78m

(2) 設計データ

貯蔵品	原油
容量	94,110 m ³
設計圧力	大気圧
設計温度	0°C
貯蔵品比重	0.86
張り込み速度	6,600 m ³ /h
抜き出し速度	660 m ³ /h

(3) タンク内容物

原油名	北海原油 “Ninian” 96%
	北海原油 “Brent” 4%
火災発生時貯蔵量	55,348m ³ @ 15°C (46,376トン)
比重	0.8455
引火点	常温以下
性状	低硫黄、軽質原油

2. 7 出火原因

英国健康保険庁(HSE)では可能性のある11項目について検討した結果、タンク屋根上に漏えいした原油から発生した可燃性蒸気が存在し、そこへフレアスタック(Flare Stack、可燃性ガス緊急燃焼塔、出火タンクから108M離れていた)から灼熱したカーボン粒子(炭素粒子、すす)が飛来し、引火したものと結論づけられた。

2.8 物的被害

- (1) 011番タンク(原油タンク)
タンク構造物、付属配管等全損被害を受けた。また、25,000トンの原油(内容物の約50%)が火災によって焼失した。
- (2) 609番タンク(軽油タンク)
約30%のタンク構造物が、損傷を受けた。
- (3) 610番タンク(重油タンク)
約50%のポリウレタン保温材が火災による損傷を受けた。

2.9 延焼の危険があった上記2基のタンクに対する対応

火災タンクから北に61m離れ、やや高い所にあった直径42m、22,630キロリットルの上記2基のタンクが放射熱に曝された(図3及び図4参照)

- (1) 609番タンク 貯蔵量 軽油4,500キロリットル
(2) 610番タンク 貯蔵量 重油2,800キロリットル
両タンクとも液表面は泡で被覆された。これらのタンクは、製油所の移動放水砲及び消防車の放水砲により冷却された。出火から4時間後には、609及び610番タンクの防油堤内に十分な水が溜まり、小型ポンプを使って放水銃に水を循環できるようになったので、消火栓及び消火用水をメインの消火活動に振り向ける事ができるようになった。

2. 10 人的被害

ボイルオーバーが発生した時に、火炎が突然巨大なものとなり、猛烈な放射熱が発散された。消防士は緊急に避難したが、その際6名が火傷を負った。数人が露出部分に熱傷を受けたが、消火服を着用していなかった英国空軍飛行隊大尉は、暫くの間入院治療を要する火傷を負った。何人かの消防士は指の複雑骨折、裂傷及び背中の火傷等を負った。

2. 11 公設消防隊到着前の状況

8月30日10時45分、火災は、タンク上部で発生、製油所の一人の消防隊員から上司へ無線によって連絡された。製油所の消防本部は、直ちに32mのはしご車、20t泡原液車及び4人の消防隊員で対応した。火災は、この時点で屋根の約半分にまで進展していたと推定された。はしご車は防油堤の南東のコーナーに配置した

隣接の消火栓からの消火用水4線と、原液車からの加圧泡原液1線が連結された。はしご車の下段のメインブーム（主伸長部）が垂直に伸ばされ、上部の2本のブームが水平に上げられた。

泡放射砲（5,000GPM:20,000LPM Chubb Slimline）はこの時、火災タンク側板トップ端部から約30mの位置にあった。泡が放射された時、放射された泡はちょうどリム部（側板と浮き屋根の間）に達し、火災の先端のシール部分に落下していた。火災は拡大しているようには見えず、したがって、北側のリム部フォームダム（泡溜め）は泡で満たされ、シール材（浮屋根とタンク側板間にある緩衝材）は保護されていると考えられた。

2. 12 公設消防到着時の状況

非番の地元消防副指令（消防吏員の階級）が10時55分に最初に現場に駆けつけた。彼は製油所のはしご車と、冷却用放水砲の配置についてアドバイスをし、東側に配置させた。最初の部隊は11時5分に到着し、直ちにタンクの3方向に水幕を張った。

さらに応援隊が到着し、他の機器も使えるようになったので放射熱に曝されている、609番及び610番タンクと火災タンクとの間に水幕を張った。

風下側からは火炎の高さは大きく見えたが、観察の結果では火災はまだ屋根面積全体の半分ぐらいであった。15分ぐらい経つと、タンク側板の塗料が変色し、タンク内原油の液面高さが分かるようになった。また、この変色によって、ホットゾーン（Hot Zone、高温層、一種の蒸留現象によって燃料層内に形成される高温領域）の速度を判断する事ができた。

消防車両は徐々に増え、20台となった。泡の一斉放射が必要という事ははっきりした時点で最初行われていた泡放射は中止され、泡必要量を確認する計算が行われた。

共同防災計画加盟の全社と、近隣の消防本部からバルク（Bulk）で泡が搬送された。Messrs. Chubb, Angus, 3 Ms, Kerrs等の消火剤メーカーとも連絡をとってバルクでミルフォードヘブンへ泡を輸送する手はずがとられた。共同防災計画に基づき、近隣製油所から大容量泡放射砲も動員された。

2. 13 消防活動経過（入手ビデオ映像による説明から）

10時53分、アモコ製油所から地元消防宛1次出動の要請があった。これは直ちに2次出動に切り替えられた。あらかじめ決められている5台のポンプ車、ホース輸送車、泡消火用機材輸送車、指揮車が出動した。11時7分、ポンプ車は10台に増やされ、“大規模石油タンク炎上中”という報告が伝えられた。11時16分、地区消防署長はポンプ車を15台に増やし、その4分後に“原油56,000トン貯蔵するタンクが炎上中、10基の放水銃

を使用して対応中”という情報が伝えられた。

さらにその直後に大量の泡消火薬剤の手配がなされ、相互援助計画も発令された事が伝えられた。副署長が、20台のポンプ車と5台のはしご車を必要とする火災の指揮をとった。

13時31分に消防本部長から、大量の冷却水を放射中で、一斉泡放射開始までに必要な特別な放射用機材の到着を待っている、というメッセージが出された。

正午までに150人以上の人員、26台のポンプ車、7台の泡搬送車、6台のはしご車、4台の特殊車両が現場に到着、消火活動に従事していた。

地元消防本部及びアモコ社の話し合いにより、燃焼中のタンクから原油を、また、放射熱に曝されている隣接の2基のタンクから貯蔵油を抜き出し始めた。

地上及びトレーラー積載の放水砲を用いて冷却活動が行われた。冷却効果を最大にするために、冷却水は側板の一本目ウインドガーダー（Wind Guarder、タンク側板に設置された風圧保護枠）の下に向けて放水された（図1）。防油堤の西側からでは、地上の放水銃では届かないため、2台のはしご車によって冷却を行った。

原油の燃焼速度は、300トン/時（7.6cm/時）と推定され、また、抜き出し速度は1,700トン/時であった。隣接の2基のタンクからの油（軽油及び重油）の抜き出しも行われ、夜中までに終了した。これらのタンクは、4基のエダクター（Eductor、吸入装置）を用い、固定泡消火配管から泡を送って油面をシールした。



図1. 出火から4時間15分後、座屈が始まっている

最初の18時間は風速も遅く、風向も一定であった。火災の傾きも無視できた。泡一斉放射に必要な泡原液の量は、計算により45,000ガロン（204,750リットル）で、切らすことなく現場に供給することが必要であった。バ

ルクで供給された泡原液は様々な車両で持ち込まれたため、中にはポンプで送る事ができないものもあった。

はしご車の泡放射砲と6基の大型泡放射砲を合わせると、合計で40,000GPM (200,000LPM) の泡放射能力があった。

これら作戦計画を組織化し、車両機器を編成するには長時間を要し、かつ困難な作業であった。特に、3基のタンクは地盤の高さが違う三箇所にあるために大変混乱し、道路もそれほど多数の車両を考慮した設計ではなかったために、事態をますます困難にした。

23時30分、消防長及び消防隊長が検討の結果、少量の泡放射を行って様子を見ることにした。化学消防車(R.A.F.MK.9)の屋根に搭載している泡放射砲を使って、6%フッ化タン白泡(牛や馬の爪等を原料とした泡消火剤にフッ化物を添加したもの)をタンクに放射した。火災が分かれるのが観察された。一方、一部油が防油堤内にスロップオーバー(Slop Over、消火水が高温燃料に触れて起こる撥水現象)を起こしたが、予測された範囲であり問題はなかった。

全泡放射用機材及び応援車両を集めて配置し、中継給水を含めて給水態勢をとり、その時点における泡原液の供給態勢を再度確認する事が決定された。この泡の供給は一旦泡放射を開始したら、たとえ燃焼している油が防油堤内に広がる事があっても、その放射を維持しつづけるに十分な量を確保しなければならないということも確認された。

この時点で消防隊長と製油所長との間で検討の結果、泡放射をさらに4時間延ばすことになった。油の温度はまだ25°Cと低く、更に常時監視されており、油の抜き出しも順調に進んでいるので、もう少し回収できるのではないかと、思われたからであった。この決定がなされた数分後、何の前触れもなく突然燃焼が巨大なものとなり、ボイルオーバーが発生した。数千トンもの油が防油堤内に飛び散り、火災となった。

火災は4エーカー(Acre:16,000m²)にも広がり、火災も3,000フィート(Feet:900m)にも達したので、放射熱は想像を絶した(図2)。隊員は火災現場から緊急退避した。何人かは放射熱による熱傷を受けた。多くの者は整地されていない、ガレキだらけの防油堤内から安全な場所に逃げる際に切り傷や擦過傷を受けた。また、ある者は熱せられた空気を吸い、身体を酷使したために、極度の身体疲労を来した。消防車2台が焼け、他にも多くが重大な損傷を受けた。放射熱に曝されたゴム製ホースは簡単に溶け、隣接タンク周辺の冷却水膜は効果がほとんどなくなった。

隊員はそれぞれ消防車を復帰させようとし、また、現場周辺に生じた多くの小火災の鎮圧に躍起となった。現場の再配置が行われる前に、出動可能な全員に対して非

常召集が行われた。ただし、正確な人数の把握はほとんど不可能であった。

司令補(消防吏員の階級)たちは隊員の掌握を行い、人数を確認するよう指示を受けた。各隊長から必要人員の報告を受けて、消防隊員の火災現場への再配置が行われた。救急車が手配され、負傷者は正門の所に設けられた救護所へ搬送された。目前の最大の問題は、水膜を復帰させるために必要な損傷を受けていないホースを見分けなければならない事であった。

多くのホースが溶け、または焼けてしまった。ホースの追加が要請され、ホース展張車一台の出動が指示された。隊員、特に応援隊員には概要を伝え、再度のボイルオーバーに備えた。



図2. 出火から13時間30分後、一回目のボイルオーバー発生(youtubeから)。巨大なファイアボールを伴い、火災は、高さ3,000Ft (900M)にも達した。約2時間後、二回目のボイルオーバーが発生した。

2時間後、2時10分頃2回目のボイルオーバーが発生し、隊員は安全な場所へ退避した。新たに取り替えたホースはまたも損傷した。更に、609、610番タンクの保温材にも火が移り、609番タンクの部材が変形して裂け、そこから噴出したペーパーに引火したが、直ちに消火された。

30分後には損傷したポンプ車を入れ替えて、冷却放水を再配置するなど、状況も安定したものとなった。

早朝になって、十分な監視のもとに安全担当消防司令及び冷却操作の非番の隊員が、泡一齐放射に備えて損傷しなかったホースの回収を行った。

8時にはタンクの油のレベルと油層内の熱波の兆候から、三回目のボイルオーバーが間もなく起きると思われたが、結果的には起こらなかった。

67,000ガロン(304,000リットル)の泡原液が現場に

到着し、更に引き続いて供給できる体制が整ったので、一斉泡放射を開始する事が決定された。

放射熱が非常に強く、ラバーホースの表面が溶け、また、放水砲や泡放射砲も大変熱く、手袋なしでは触れなかった。

したがって、消火戦術としては、一本の大型放射砲で冷却放水を行い、放射熱の抑制を行って他の放射砲を保護する、という方法を取ることが決定された。猛烈な放射熱のために、隊員は放射砲の近くで短時間しか作業できなかったため、この冷却放水の効果は大きかった。

泡放射攻撃は2ヶ所で行われた。1ヶ所は防油堤内で、R.A.F.化学消防車の屋根に搭載したモニターからA3F（注：水成膜泡）を放射し、これを2台の牽引型大型泡放射砲からタンク白泡を打って支援した。

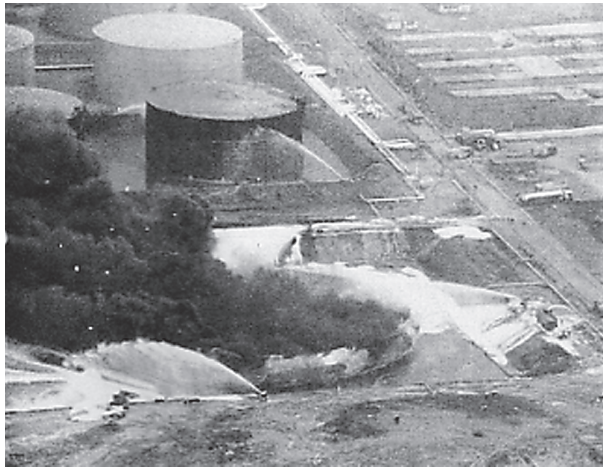


図3. 出火から44時間後本格的泡放射1時間前の状況⁴⁾

消火戦術としては、大型泡放射砲を両側から打って、火をタンク側板から追いやり、A3Fを大量に打って消火する方法をとった。もう1箇所は、4基の大型泡放射砲を配置しタンク内に直接泡放射を行った。泡放射は1日中、間断なく続けられ、15時になってようやく明らかに火炎の勢いが衰え始めた。ただし、タンク内の熱はまだかなりあって泡が破壊されるために、泡で完全に被覆するまでには至らなかった。その時点で防油堤内は80%が被覆され、順調に進行した。

18時にはタンク内に小火炎が残るのみとなった。泡放射により火炎温度を下げると共に、鎮火させるために放射は更に暫く続けられた。

9月1日早朝になって、泡の供給が一時的に途絶えたために、火の勢いが増して、泡の被覆の一部が破壊された。延焼はタンク内に広がる事はなかったが、風速が増したこともあって一時心配された。BI-Pod 泡放射砲（はしご車の一種）が現場に緊急に配置されジブ（Jib、はし

ご車の伸長部）を伸ばした。ジブを最長にすると、側板が折れ曲がって泡被覆がされず火が残っている所へも、泡放射が可能であった。

泡原液が再度入手できるようになって3時間後、火は全て鎮火した。その後数時間、泡放射は続行された。3台のはしご車の放射砲が、座屈して完全につぶれた状態になったタンクの上から泡を投入した。その結果、1日22時30分（出火から約59時間半後）、地元消防本部・消防長が正式に“鎮火”を宣言した。

3. 消防活動における問題点

(1) 固定式泡消火設備及び移動式消火設備

英国の法規制では、浮き屋根式タンクは固定屋根式タンクよりリスクが低いとされ、固定泡設備は必ずしも必要ではなく、移動式設備でもよい¹⁴⁾、ということになっている。このため石油業界では、固定式泡消火設備を設けることなく、主として31.5mのはしご車、20t原液車及び泡放射砲から構成される、日本・消防法で義務付けられた3点セット（高所放水車、ポンプ車、泡運搬車）と類似した高所放水車を中心とした消防車両のみを備えるようになった。

(2) 水源と給水ポンプの制約

水源は、24B（610mm）の公設給水配管から給水される2.5百万ガロン（113,000トン）の給水タンクと、4.6百万ガロン（209,000トン）の放流池とがあった。

発災タンクの直近の消火栓は、タンクの北及び東にある5号及びH号道路上にあった。消防隊は、既設消火ポンプの応援として2台の1,000GPM（4,500LPM）のポンプを使用し、給水タンクから消火用主管に送水した。さらに、もう一台のジーゼル駆動ポンプ3,000GPM（13,500LPM）、200PSI（13.8 bar）を用いて消火用主管に送水した。

LPG球形タンクの散水冷却用水が必要であったために、消火用及び周辺冷却用水がかなり制限された。さらに、609及び610タンクへの水幕用水が必要であった。

結局、消火配管からは最大3基の泡放射砲しか給水できず、0.5マイル（800m）離れた放流池から中継送水せざるを得なかった。3台中継送水が必要で、1台目はダイフェッド署の1,000GPMのポンプ車が、2台目は500GPMのポンプが使われ、6線の70mmのホースが使われた。3台目にはホース展張車を使用して6インチホースを展張した。約15台ものポンプ車が火災現場への給水に使用せざるを得なかった。

(3) 泡原液の供給

英国内務省基準¹⁴⁾では、「泡原液は、承認された場所に貯蔵し、種類及び量は、許可行政機関との協議の上決めること」となっている。この基準及び工場の基準共に浮き屋根式タンクはリム（リング）火災が最大のリスク

としていたので(タンク全面火災は想定外)、この想定のみであれば直ちに使う量は十分であった。

アモコ製油所は7,500ガロン(34,095リットル)を一箇所は栈橋のタンク(4,500; 20,455リットル)に、残りは原液運搬車が貯蔵していた。同様のレベルで他の製油所も泡原液を保有していた。消防本部の原液は、2台のタンク車に積載しているものと、港に停泊しているタグ(消防艇)に積載しているものがあつた。

合計で、36,000ガロン(163,655リットル)が利用可能であった。更に予備として、泡メーカーと近隣消防本部に対して手配を要請した。実際の泡原液使用量は167,899ガロン(763,055リットル)であった。

泡原液必要量の計算には、幾つかの計算式が提案されているが、結果的にはエッソ石油が自社の消防マニュアルに記載している式がより現実性があり、これによると、タンクの消火のみで41,383.5ガロン(188,077リットル)必要ということになった。

(4) タンク及び防油堤の配置

前述の基準¹⁴⁾では、火災タンクと同サイズの浮屋根式タンクは同一防油堤内に3基まで配置してよい事になっている。また、タンク間距離は最大タンクの直径の0.3以上で、かつ、10mを超えなければならない。

今回の場合は、タンク1基のための長方形防油堤(180m×90m)で、タンク容量の約115%の容量があり、タンクは東の端から約10mの位置に建てられていた。5号道路の反対側の隣接防油堤には、61m(0.78D、D:タンク直径)離れて609及び610タンクがあつた。これらのタンクは初期の段階から水幕による冷却が必要であつたが、十分行われず、結果的には被害を受けた。

もし、基準に則つて、同一防油堤内に011番タンクと同容量のタンク3基が設置されていたら、あるいは、609番タンクと610番タンクの間隔が小さかつたならば、これらすべてのタンクを巻き込んだ、さらに大規模な火災になっていたであろう(法令の基準が、ボイルオーバーに関しては不十分である。日本も同様)。

(5) この事故の結果、幾つかの課題が提起された。

ア フレアスタックの位置はタンクから108mしかなく、危険物施設からの距離としては近すぎる(図4及び図5参照)。また、フレアチップの清掃頻度をあげる必要性がある。

イ 固定消火設備は緊急時の対応のために全自動か少なくとも一部は自動化すべき。

ウ 放射熱のリスクを最小限にして、消火活動をより効果的にするために、タンク間距離をより大きくし、ある容量以上のタンクについては、タンクごとの防油堤にすべき。

エ ストックされている泡原液の貯蔵期間は殆ど不明で消火性能も不明であつた。緊急時に大量の在庫が直ちに

使用できるように常時品質を維持しておくことが望ましい。オ タンクの保守管理は高い優先度を持たせ、万一欠陥が発見された時は、タンクが空になるのを待つて補修を行うのではなく、直ちに対応をとる必要がある。

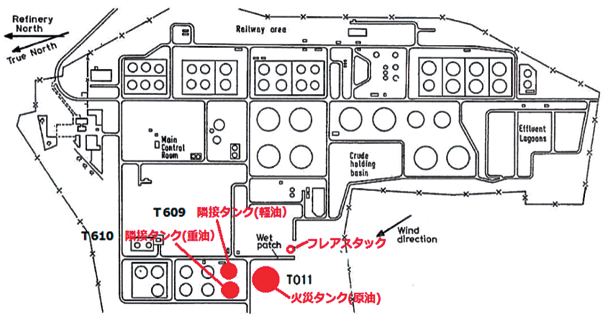


図4. アモコ製油所タンク配置フレアスタックと火災タンクの距離は明らかに近すぎる(108M)

カ 泡原液の必要量算出式は実験に基づき修正がなされてきたが、それらの予熱時間は最長のものでも10分以下である。しかし、この火災のみでなく、他の例からも予熱時間が長くなると、特に高温の油の場合は泡の破壊が起こるので、より大量の泡が必要になる事が分かっている。また、被覆する面積が大きくなるほど、小面積の泡必要量を求める式から計算した量より多くの泡を必要とする。

さらに、このような大規模な火災の際には、熱による上昇気流が発生するため、計算した泡放射必要量に大いに影響する。

従つて、今日認められている泡原液必要量の計算式やテストも、より現実的な予熱時間を考慮したものにすべきである。



図5. 出火から4時間15分後⁴⁾

4. 考察

4.1 製油所から提供すべき情報

地元消防本部はアモコ製油所に関しては、操業開始時から消火用水、泡消火薬剤量、消防設備等について掌握していた。

また、この製油所はもちろん、この地域の他の製油所も大規模な総合訓練を何度か行っており、一般的な消防計画も承認されていた。事故後振り返ってみると、この消防計画はごく一般的なものであり、下記のような情報が盛り込まれるべきであった。

- (1) 冷却用水必要量
- (2) 泡放射に必要な水量
- (3) タンクごとの消火用泡必要量
- (4) 隣接製油所同士の相互援助計画
- (5) 実績のある泡放射量計算式
- (6) 各種想定に基づく、指揮者の現実的なトレーニング
- (7) 既に実施しているが製油所同士の大規模な訓練

4.2 コミュニケーション

通常、この事故のような危機的状況では、指揮者の指示、命令をいろいろな組織や多くの隊員に徹底することは大変難しいが、この事例の場合はコミュニケーション上の問題はほとんどなかった。

現場は数部署に分けられ、各消防隊員が各部署を担当し、それぞれ無線により前線指揮者及び総指揮者と連絡を取りあった。個々の安全、給水、泡供給、燃料、給食、通信等の統制はそれぞれの指揮者または副指揮者の指揮下に置き、彼らは相互に前線指揮者及び総指揮者と連絡を取った。

また、前線指揮者及び総指揮者は、他地域の公設消防本部及び製油所の管理部門と連携をとった。

4.3 泡消火剤の必要量

計算上の泡消火剤必要量は188,077リットルであったのに対し、実際に使用された泡消火剤の量は、763,055リットルと膨大な量であった。これは、途中で泡放射を中断したことと、高温のホットゾーンによる泡被覆の破壊がガソリン等軽質油火災よりも激しいことによると思われる。

ちなみに2001年にWF&HC (Williams Fire & Hazard Control) 社がほぼ同じ規模(直径81M)のガソリンタンク火災を消火した際、計算上必要な消火剤量89,000リットルに対し、実際に使用した消火剤量は106,000リットルであった。今回の火災でいかに多量の泡消費量が使われたか判る。

4.4 異種泡の混合使用

本火災では、タンク白泡と界面活性剤タイプの泡をそれぞれ異なる濃度で使用したが全く支障なかった。

日本でも発泡後タンク内で混合されることは問題ない

とされているが、異種類の原液同士の混合は不可とされている。

荷姿はバルクでないと使い難い。

4.5 火災タンクからの油抽出の是非

タンク火災の消火戦術として、API (American Petroleum Institute、米国石油協会) ガイドラインでは火災タンクから油を抜いて回収する事を奨めている¹⁵⁾が、日本では統一された見解がない。

本火災でも1,700トン/時の流速で油を抜き出したが、指揮を執ったMike H. George氏によると、「油を抜き出したことは明らかに失敗で、燃焼面を下げることになり、ヒートウェーブ(ホットゾーン下部)が底面の水分に達する速度を加速させ、ボイルオーバーの発生を予想よりも早くさせてしまった。今後同じような状況になれば、油を導入するか、付属のミキサーを回すことも検討する。また、609軽油タンクからも油を抜いたが、結果的に火災がタンク側板を炙ることになり、座屈を招いてしまった。」とのことであった。

油を抜くことについて、筆者がWF&HC社のDwight Williams氏にも見解²⁰⁾をきいたところ、油を抜き出すことは以下の理由により強く反対である、との意見であった。ただし、水や油を張り込んだり、ミキサーを運転したりすることは、未解明なことが多すぎるので賛成できないとの意見でもあった。

火災タンクから油を抜く事は、ボイルオーバーによって飛散する油の量を減らす事にはなるが、もし消火できない場合はヒートウェーブを極端に進行させ、ボイルオーバーの発生を早める事になる。したがって、全面火災を起こしている原油タンクから油を抜くと言う決定は、消火が不可能と言う事がはっきりした時点でなされるべきである。その他、筆者が面談した以下の3名の大規模タンクの火災経験者は、すべて油の抜き出しには反対であった²⁰⁾。[WF&HC社チーフJ.W.Craft氏、米国アモコ社テキサス製油所消防隊長J.McLemore氏、カナダスノコ(Sunoco)社サーニア(Sarnia)製油所消防隊長G.R.Hatfield氏]。

以上5氏ともに油の抜き出しには反対意見で一致していることは注目に値するが、引き続き、検討する課題である。

4.6 ボイルオーバーの予兆

ボイルオーバーの予兆として、多くの現象が観測される。本火災でも、同様の予兆が観測された。

- (1) 火災の輝度が上がり、明らかに黄色がかった。
- (2) 火災の高さが上がった。
- (3) 煙がきれいになった。煙の色が明らかに薄くなった。
- (4) 最も顕著だったのは燃焼音で、ボイルオーバーが発

生する約1分前にパチパチという音や、ポンポンという水がはじける音が発生した。

(5) 通常の燃焼状態からボイルオーバーに転ずるまでの時間は非常に短く、1分もないと考えた方がよい。最初の予兆を認識してから90秒も経たずにボイルオーバーが発生した。

(6) 旧石油公団等によって苫小牧で行われたボイルオーバー実験^{12,17)}でもこの音とともに、タンク上端部からスチームの白煙が観察され始めてから数十秒後にボイルオーバーが発生することが確認された¹⁸⁾。しかし、直径80mを超えるタンクでボイルオーバーが発生すると、油は数百メートルに亘って飛び散ると考えられ、上記の予兆が始まってからタンク周辺で活動している消防隊員を避難させたのでは遅い。

また、エマルジョン(Emulsion、水油の混合)によるフロソオーバー(Froth Over、油及び水の膨張によるタンクからの溢れ出し現象)の場合には何の予兆もなく、いきなり泡立った油が噴出する可能性があるので注意を要する。

4. 7 ボイルオーバー発生時の放射熱の危険性

(1) もしボイルオーバーが、タンクが林立するタンク地区で発生すると、周辺タンクが適切に冷却されていない場合には周辺に与える放射熱の影響は大きい。

(2) 300m以内にあった消防車両は放射熱により重大な損傷を受けた。また、ホース中の水が沸騰してホースを破裂させ、泡放射砲は破壊された。このことは、ボイルオーバーの発生が迫ったと思われる場合には、人員の避難だけでなく、消防車両も撤退させる必要がある。

(3) 火災が初期の段階で、まだタンクがそのままの高さを保っている間はタンクの直近まで接近できたが、タンク側板が座屈し始めた段階からは急速に放射熱が増加した。

ボイルオーバーが発生している数分間は、たとえ防火服を着ていても400m以内で生存することは不可能であると思われるほどであった。ボイルオーバーが終わった後は、注意しつつタンク側板から50Mぐらいまで前進することはできた。

1964年の新潟地震の際に、消火活動の応援に行った消防隊員の話によると、燃焼中のタンクの最下段側板まで行き、タンク側板の温度が低く接触できた¹⁹⁾とのことであり、火災タンクの周辺作業を行う上で参考となる。

4. 8 意図的スロップオーバー

原油タンク火災の際の問題の一つとして、燃焼面が高温であるため、放射された泡から分離した水によるスロップオーバーが発生するということがある。

本火災でも意図的にスロップオーバーを発生させたが、必ずしも大規模なものではなく、防油堤内に溢れてもコントロールできた。本件についてのAPIガイドライン

¹⁵⁾及び前述のDwight Williams氏の見解^{*20)}は下記の通りである。

もともと大型タンクで、原油がある深さでホットゾーンを形成しているような場合、泡放射の準備が完了したら最初に扇状に水放射を行い、燃料表面温度を100°C近くに下げた後、泡放射を行う必要がある。冷却せずに中央部分に大量の泡放射を行うと、局所的な水の蒸発によって泡が破壊されるからである。ただし、水放射を行うと、必ずスロップオーバーが発生し、防油堤内で小火災が発生することがあるが、予測がつくので容易に対応ができる。この場合のスロップオーバーは必ずしも大規模な油の噴出やファイアーボール(Fire Ball)を伴うものではなく、多くの場合、燃料表面の一部が溢れ出る程度であり、コントロール可能である。

日本においては、スロップオーバーが起こっても燃焼面を冷却するために放水する、という消火戦術はないので非常に参考になる。

4. 9 タンクの側板の座屈

提供されたビデオ映像によると、いったん火災になってしまうと、いかにタンク側板を冷却しても燃焼面レベルでのタンク側板の座屈は避けられないことが分かる(図1)。特に、ウインドガーダーの多いタンクはトップヘビー(重心が高いこと)であり、火災の際には座屈しやすいと考えられる。

4. 10 原油タンク中の水分と管理

原油中の水分はもともと存在していたものと、輸送中及び貯蔵中に呼吸作用等によって侵入したものとがある。備蓄タンクのように長期間に亘って貯蔵された原油の水分は沈降分離され、定期的に水切りが行われるので通常は0.1%以下に保たれている。しかし、大型タンクは直径が82mもあって、必ずしも水切り配管ノズルが最も低い位置にあるとはいえない。また、底板には凹凸があるので仮に、10トンの水が凹凸部やアニュラー(Annular、タンク底板の一部)部に偏在していたとすれば、ヒートウエーブ(Heat Wave)と接触して17,000m³の水蒸気になり、油を噴出させるに十分なエネルギーとなり得る。従って、原油タンク中にはボイルオーバーを発生させるに足る水分が常に存在すると考えるべきであろう。さらに、長期間貯蔵されることによってワキシイスラッジ(Waxy Sludge)が層を形成しており、この層に含まれる水分量及びその高さも把握しておく必要がある。

4. 11 ボイルオーバーによる予想される被害

ボイルオーバーによる被害には、燃えている油の飛散流出によるものと、ファイアーボール状の火災による放射熱によるものがある。

油の飛散流出範囲は防油堤外まで及び、少なくとも四方の隣接タンクを巻き込み、連鎖的に複数タンクの火災になることを意味する。また大量の油が排水系統に流れ込むことが予想される。

一方、強い放射熱によって、タンク周辺の可燃物、電気配線類、配管パッキン、消防車輛、ホース等は焼損する。当然、現場に消防隊員がいれば人身災害も発生する。

1999年、苫小牧で行った実験では、ボイルオーバー発生時の放射熱は定常燃焼時の5～22倍に達した^{13,16)}。このことは、長時間耐えられる放射強度1000kcal/m²hrの場所であっても、22,000kcal/m²hrに達する可能性があることを意味し、ボイルオーバーの予兆があった場合、早めに避難する必要がある。

本事例においても、消防車両が焼損し、ホースが溶けてしまったり、防火服を着用していなかった隊員が火傷を負ったりしている。従って、消防隊員のみでなく、防油堤内でタンクの冷却放水や土嚢積み作業等に携わる応援隊員も万一に備えて防火服を着用すべきである。

4. 12 ボイルオーバー発生の予測

エマルジョン層がなく、遊離水分のみが底部に存在する場合には、タンク尺(タンク高さ)をヒートウエーブ進展速度(概ね2m/時間)で割ってボイルオーバー発生までのおおよその時間を予測することができる。

実際の火災の場合にはタンク壁に放水して水の蒸発状態からホットゾーンの位置を推測したり、タンク側板塗装の変色状況からホットゾーンの位置を常時観測することが可能である(図1)。ただし、エマルジョン層がある場合には予測できないので注意を要する。

4. 13 人員の掌握とコントロール

自衛防災隊員のみでなく、応援隊員についても所属、氏名まで掌握しておくべきである。長期戦になった場合の交替、夜間やボイルオーバー等緊急時の隊員把握、給食等必ず隊員の掌握が必要になるからである。

4. 14 プレブランチング

原油タンクの火災は精製油のタンク火災と異なり特殊であるということ、放射された泡は、タンク内で液面上を30m以上は展開しないので、60m以上のタンク消火は通常の高所放水車等による泡放射方法では困難であること^{15,17)}、大容量泡放射砲及び大量の消火用水が必要になること、80m以上の大規模原油タンクの火災は世界的にもほとんど経験されていないこと等の理由により事前に十分検討しておく必要がある。

日本においても最近では事業所において消防計画を定めているが、アメリカにおけるプレブランチングの例を下記にあげる。

- (1) タンクごとの泡放射密度
- (2) タンクごとに必要な泡消火剤量
- (3) タンクごとに必要な消火用水量及び冷却水量
- (4) 水利(消火配管が使用できない場合の対策)
- (5) 排水方法
- (6) 上記泡、水を放射する放射砲、車輛、人員数及び配置
- (7) 外部からの泡の調達方法、時間、荷姿、搬入方法
- (8) 泡メーカーの在庫、緊急時の輸送方法
- (9) 応援隊役割、到着予想時間
- (10) 通信、連絡方法
- (11) 組織：下記のような担当を特に設けている
 - ・泡補給担当：泡の使用量算出と補給責任
 - ・水利担当：放水量及び消火用水量確認
 - ・監視担当：常時火災の状況を監視し、指揮本部へ連絡
- (12) ボイルオーバーが発生した場合の油の流路確認。
- (13) ボイルオーバー現象は原油の種類、貯蔵状況、スラッジの有無等によって異なるので、小規模な実験を行ってそれぞれ確認。

4. 15 指揮者の役割

火災時、特に、大規模な地震後の火災に対応するためには、事業所の現地対策本部が重要であり、その本部長の役割は重要である。特に、大規模な地震が起きた時、公設消防は一般火災に優先的に人員、資機材を回すため、事業所の消防隊の初期対応に期待がかかる。

そのためには十分な素養がある指揮者(消防技術者)を日ごろから育成しておく必要があるが、事業所に着任時、座学によりタンク消火に関する知識を身につけ、定期的机上訓練や想定訓練によって指揮能力を習得する仕組みを構築することが必要である。

筆者らは、指揮者がこの複雑な判断、指揮を的確にできるように支援するシステムとして、「防災支援システム」を提案し、特許を取得した²¹⁾。このシステムを運用するうえでも本事例は参考になる。防災支援システムの詳細については別途論ずる。

4. 16 消防隊員の訓練

指揮者はもちろん、消防隊員は、油そのものについての物性等の知識を持ち、さらにはタンクの構造、油火災の挙動等々について理解しておく必要がある。その上で原油タンク火災は他の油火災とは異なるということを認識し、特に原油の燃焼特性や、ボイルオーバーにいたるメカニズムを理解しておく必要がある。そのためには、不断の訓練が必要である。

5. まとめ

以下、本報告を通して得られた結果をまとめる。

- (1) 大規模石油タンクの火災に対応するには、知識及び経験が必要である。しかしながら事例が少なく、消火に当たった経験者が少ないので、過去の事例を紐解いて学んでおく必要がある。
- (2) 原油タンク火災の際にはボイルオーバーが発生する前に消火することが大切である。さもないと、連鎖的に複数タンクの火災となり壊滅的被害を受ける。
- (3) 指揮者及び消防隊員は、原油の燃焼特性とボイルオーバーの発生メカニズム及びボイルオーバーが発生した場合の影響を理解しておく必要がある。
- (4) 原油火災は、軽質油タンク火災とは異なり独特の消火方法を熟知しておく必要がある。
- (5) 原油タンク火災の際には、高温の高温層のために泡が破壊されるため、法で定める量よりもかなり多量の泡消火剤を必要とする。
- (6) 泡放射を開始したら、鎮火するまで放射を続けなければならない。
- (7) 火災タンクから油を抜き出すことは、下記の理由で危険性が増す可能性がある。
 - 1) 原油タンク及び軽質油タンクにおいても燃焼面からのタンク壁の座屈を招く。
 - 2) 原油タンクの場合は、最も危険なボイルオーバーの発生を早める。
- (8) 化学及び機械工学の素養がある指揮者（消防技術者）及び訓練を積んだ消防隊員の教育、育成が必要である。
- (9) 筆者らは、危機的状況の中で指揮者が的確な判断を行い、指揮を執ることができるよう支援する「防災支援システム」を提案した。
- (10) 大地震等においては、火災の初期段階で公設消防があまり期待できないことから、民間消防隊の役割は大きい。本報告は、あくまで一面的な見方であり、今後、より高いレベルの消防活動を目指すべきと考える。

謝辞

本文を起草するにあたり、事故報告書及びビデオテープをご提供頂いただいたのみならず、現地をご案内いただくとともに質疑にも応じていただいた、元Mid & West Wales Fire Brigade, Area Commander, M. H. George氏及び、面談に応じていただいた米国WF&HC社社長D. Williams氏、同Fire Chief J.W.Craft氏、米国Amoco社Texas製油所消防隊長J.McLemore氏、カナダSunoco社Sarnia製油所消防隊長 G.R.Hatfield氏に深甚な謝意を表します。

参考文献

- 1) E. WoodworthMiles : Whiting Refinery FireQuarterly of NFPA-Oct. 1955
- 2) E. WoodworthMiles : Oil Froth Fire at Signal Hill Refinery. Quarterly of NFPA-52 (2) P.85, Oct.1958
- 3) HenryMartin : Scores Die in Tank Fire Boiler. Fire Service Today (Vol.50 No6) , June, 1983
- 4) Dyfed County Fire Brigade : Report of the Investigation into the Fire at Amoco Refinery-30th Aug. 1983*
- 5) H. H.Hall: Oil Tank Boiler. Mechanical Engineering, 47 (7) , 540, 1925
- 6) J.H.Burgoyne &Katan : Fires in Open Tanks of Petroleum Products: Some Fundamental Aspects. J. of the Institutes of Petroleum, 33, 158 (1947)
- 7) V.I. Blinov& G. N. Khudyakov : Diffusion Burning of Liquids. (English translation by US Army Engineering Research Developing Laboratories, T-1490 a-c, ASTIA, AD 296 762, 1969
- 8) H. Kazutoshi : Experimental Study on the Mechanism of Hot Zone Formation in Open Tank Fires. Fire Safety Science 2, 221-230, 1988
- 9) 長谷川和俊 :石油タンクにおけるボイルオーバー —その生成機構—.日本火災学会誌、40 (4) p21-27, 1990
- 10) H. KosekiKokkalaMatti, W. MulhollandGeorge : Experimental Study of Boilover in Crude Oil Fires. Fire Safety Science 3, 865-874,1992
- 11) 古積博:“石油タンクの火災性状の研究”、学位論文(東京大学)、1996.2
- 12) H. Koseki,Y. Natsume, Y. Iwata, T. Takahashi, T. Hirano : Large Scale Boilover Experiments Using Crude Oil. Fire Safety Journal, 41,529-535,2000
- 13) H. Koseki,Y. Natsume, Y. Iwata, T. Takahashi, T. Hirano: A Study on Large Scale Boilover UsingCrude Oil Containing Emulsified Water. Fire Safety Journal. 38,665-677,2003
- 14) The Refinery Safety Code — Part 3 of the Institute of Petroleum Model Code of Safety Practice in the Petroleum Industry, 3Rd Edition, 1981
- 15) API : Fighting Fires in and around Flammable and Combustible Liquid Atmospheric Storage Tanks.Third Edition, January 1974
- 16) 夏目泰忠、古積博、岩田雄策 :大規模な原油のボイルオーバー実験.消研輯報Vol53,1999
- 17) 夏目泰忠 :石油公団に対する“海外事故調査報告書”. 1999.3
- 18) 佐井隆之氏談、1964.6
- 19) WF & HC社トレーニングテキスト : Storage Tank Fires – Boilovers, Frothovers, Sloppers. 1998
- 20) 苫小牧ボイルオーバー実験、ビデオ映像記録、1999

- 21) 夏目泰忠他 : 防災支援システム. 特許番号3388065、
2003.1.10 (登録)
- 22) <http://tank-accident.blogspot.jp/>