

# 石油コンビナートの防災アセスメント指針

平成 25 年 3 月

消防庁特殊災害室



# 目 次

第1章 防災アセスメントの目的と対象	1
1.1 防災アセスメントの目的	1
1.2 防災アセスメントの対象	1
第2章 防災アセスメントの基本概念	2
2.1 防災アセスメントの考え方	2
2.2 確率的なリスク評価の考え方	2
2.3 評価のレベル（評価の細かさ）	6
2.4 評価にあたっての留意点	6
第3章 対象施設・地震の想定	8
3.1 対象施設	8
3.2 地震の想定	11
第3章 参考文献	12
第4章 災害の発生・拡大シナリオの展開	13
4.1 初期事象の設定	13
4.2 事象分岐の設定	15
4.3 イベントツリーの展開	16
4.3.1 単独災害のシナリオ	17
4.3.2 大規模災害のシナリオ	19
4.3.3 津波による災害のシナリオ	20
4.4 各シナリオの評価方針	20
第5章 確率的なリスク評価	22
5.1 災害の発生危険度の推定	22
5.1.1 平常時の災害発生危険度	22
5.1.2 地震時の災害発生危険度	28
5.2 災害の影響度の推定	45
5.2.1 解析モデルの選定	45
5.2.2 基準値の設定	47
5.2.3 影響度の推定	57
5.3 総合的な災害危険性（リスク）の評価	59
第5章 参考文献	62

<b>第6章 長周期地震動による被害の評価</b>	63
6.1 速度応答スペクトルの算定	63
6.2 スロッシング波高の算定	64
6.3 溢流量の推定・流出火災の想定（浮き屋根式）	65
6.4 タンク火災の想定（浮き屋根式）	65
6.5 ドレン排水口からの流出想定（浮き屋根式）	67
6.6 内部浮き蓋付きタンクの災害想定	67
6.7 固定屋根式タンクの災害想定	68
6.8 想定災害の影響評価	68
第6章 参考文献	69
<b>第7章 大規模災害の評価</b>	70
7.1 危険物タンクの災害	70
7.1.1 防油堤から海上への流出	70
7.1.2 防油堤火災からの延焼拡大	72
7.2 高圧ガスタンク（可燃性）の災害	73
第7章 参考文献	74
<b>第8章 津波による災害の評価</b>	75
8.1 危険物タンクの被害	75
8.1.1 津波によるタンクの破損	75
8.1.2 地震による流出後の津波	78
8.2 高圧ガスタンクの被害	78
第8章 参考文献	80
<b>第9章 防災アセスメント結果の活用と公表</b>	81
9.1 アセスメント結果に基づく防災対策の考え方	81
9.2 大規模災害を想定した避難計画の考え方	85
9.3 防災アセスメント結果の公表	88
補足 緊急停止に係る安全上の留意事項	90
第9章 参考文献	92
<b>参考資料</b>	
1. 災害の発生・拡大シナリオの一例	93
2. 災害現象解析モデルの一例	123
3. スロッシングによる溢流量の計算	157
4. 危険物タンクの津波被害シミュレーションツール	161

## 第1章 防災アセスメントの目的と対象

### 1.1 防災アセスメントの目的

石油コンビナート等特別防災区域（以下「石油コンビナート」という）を有する都道府県は、石油コンビナート等災害防止法に基づいて特別防災区域に係る防災計画（石油コンビナート等防災計画）を作成し、毎年これに検討を加え、必要に応じて修正しなければならないとされている。

また、防災計画を策定するにあたっては、特別防災区域で発生する可能性のある災害の種類、規模、影響等を把握するための災害の想定が不可欠であることから、「災害の想定に関すること」が計画に定めるべき事項として規定されている。

この災害の想定をできるだけ客観的かつ現実的なものとするために、消防庁は平成6年3月に「石油コンビナートの防災アセスメントの策定指針」を示し、平成13年に阪神・淡路大震災の被害を踏まえて改訂を行った。しかしながら、平成23年に発生した東日本大震災では、広範囲にわたって危険物施設や高圧ガス施設が被害を受け、これまで経験したことがないLPGタンクの爆発火災、津波による石油類の大量流出や大規模火災が発生した。

本指針は、平成13年改訂の指針（以下「現指針（平成13年）」という）をベースとし、東日本大震災の被害状況やこれにより得られた新たな知見をもとにさらなる改訂を行ったものである。石油コンビナートを有する都道府県は、防災計画の策定（修正）を行うにあたって、本指針を参考にして対象とする石油コンビナートの実態に応じた防災アセスメントを実施されたい。

なお、石油コンビナートには多種多様な数多くの施設があり、これらで発生し得るすべての災害を網羅して示すことは難しい。したがって、各都道府県では、それぞれが所管する石油コンビナートの状況を十分に把握し、本指針で取り上げていない施設や災害が重要と考えられる場合には、本指針の考え方を参考に、立地環境なども考慮して独自に評価を行うことを推奨する。

### 1.2 防災アセスメントの対象

#### (1) 対象とする地域・施設

本指針で前提とする防災アセスメントは、実施主体となる都道府県が所管する石油コンビナートの全域を対象とし、その周辺も含めた地域の危険性を評価するものである。評価対象とする施設は、原則として石油コンビナートのなかの事業所にあつて、可燃性物質や毒性物質を大量に貯蔵・処理するなど潜在危険性が大きい製造施設、貯蔵施設、入出荷施設、移送施設などである。

#### (2) 対象とする災害

この防災アセスメントでは、平常時及び地震時に上記(1)の石油コンビナート施設で発生する可能性がある漏洩、火災、爆発などの災害を対象とする。なお、平常時は原則として運転中（可燃性物質や毒性物質の貯蔵・処理中）の事故を対象とし、地震時は短周期地震動（強震動及び液状化）、長周期地震動及び津波による災害を対象とする。

## 第2章 防災アセスメントの基本概念

### 2.1 防災アセスメントの考え方

防災アセスメントでは、まず対象とする石油コンビナート施設において平常時や地震時に起こり得る災害の発生と拡大のシナリオを描くことから始まる。シナリオは、災害の引き金となる事象（初期事象）を先頭に記し、これに続く災害の拡大様相を防災設備の成否などにより分岐させたイベントツリー（Event Tree：ET）と呼ばれる図で表現する。この ET 図をもとに、それぞれの災害の特性に応じて次のような定量的評価を行い、防災計画策定において想定すべき災害の種類や規模を特定する。

- 確率的なリスク評価：平常時の事故、地震時の短周期地震動による被害
- 確定的な定量評価：長周期地震動による被害、津波による被害（一部）

なお、本アセスメントの定量的評価は簡易な手法の適用を前提とするもので、災害（シナリオ）によってはこれが困難なものもある。このような災害については、災害拡大シナリオをもとに防災対策の要点を提示するにとどめるが、各都道府県において数値シミュレーションなどの詳細な手法の適用が可能であれば、これらに基づいた具体的な検討を行うことが望ましい。

### 2.2 確率的なリスク評価の考え方

平常時の事故、地震時の強震動による被害において適用する確率的なリスク評価手法の概要は以下のとおりである。

#### (1) リスクの概念

われわれはよく「危険」とその反対の「安全」という言葉を耳にする。危険か安全かは主観的なもので、ある人には安全と思われることでも別の人には危険と思われることもよくある。社会はしばしば絶対安全を要求するが、危険がまったくないということは現実的にはあり得ない。

絶対安全が実現不可能であるとすれば、危険がどの程度であれば安全といえるか。このような評価を定量的に行うために、海外では「リスク」という概念がよく用いられる。リスクは、危険な事象（例えば事故）の発生危険度と発生したときの影響度の積として表わされ、一般的に次のように定義される。

$$R = \sum_i F_i \cdot C_i$$

ただし、

R：評価対象とする系のリスク

$F_i$ ：事象  $i$  の発生危険度

$C_i$ ：事象  $i$  が発生したときの影響度

事象の発生危険度（ $F_i$ ）は確率または頻度によって定量化される。確率は、N 回の試行に対するある事象の出現回数を  $n$  回としたとき  $n/N$  として表わされ、0 と 1 の間の無次元数（単位を持たない数）となる。頻度は、一定期間にある事象が出現する回数で、リスク評価では 1 年あたりの出現回数として「/年」という単位をつけて表わされることが多い。事象によっては 1 年に 1 回以上出

現するようなものも考えられ、確率のように 0 と 1 の間になるとは限らない。

リスク評価では、故障の発生確率や事故の発生頻度といった非常に小さな数値を扱うため、次のような指数表示がよく用いられる。

- $10^{-2}$  : 確率 → 100 回に 1 回発生  
頻度 → 100 年に 1 回発生
- $5 \times 10^{-3}$  : 確率 → 200 回に 1 回発生  
頻度 → 200 年に 1 回発生
- $2 \times 10^{-3}$  : 確率 → 500 回に 1 回発生  
頻度 → 500 年に 1 回発生

一方、事象が発生したときの影響度 ( $C_i$ ) に関しては、評価の目的に応じて放射熱や爆風圧などの物理的作用が被害を及ぼす範囲の大きさ、死者数や負傷者数などの人的被害、損害額などの経済的損失が用いられる。

## (2) 防災アセスメントにおけるリスク評価

石油コンビナートの防災アセスメントにおいても、上記のようなリスクの概念を導入して評価を行う。ただし、災害の発生危険度と影響度の積としてのリスク表現を用いるのではなく、これらの両面から災害危険性を総合的に評価することにより、想定災害の抽出や防災対策の優先度の検討を行う。このような手法はリスクマトリックスと呼ばれ、リスク評価においては多方面で用いられている。防災アセスメントにおけるリスク評価の概念を図 2.1 に示す。

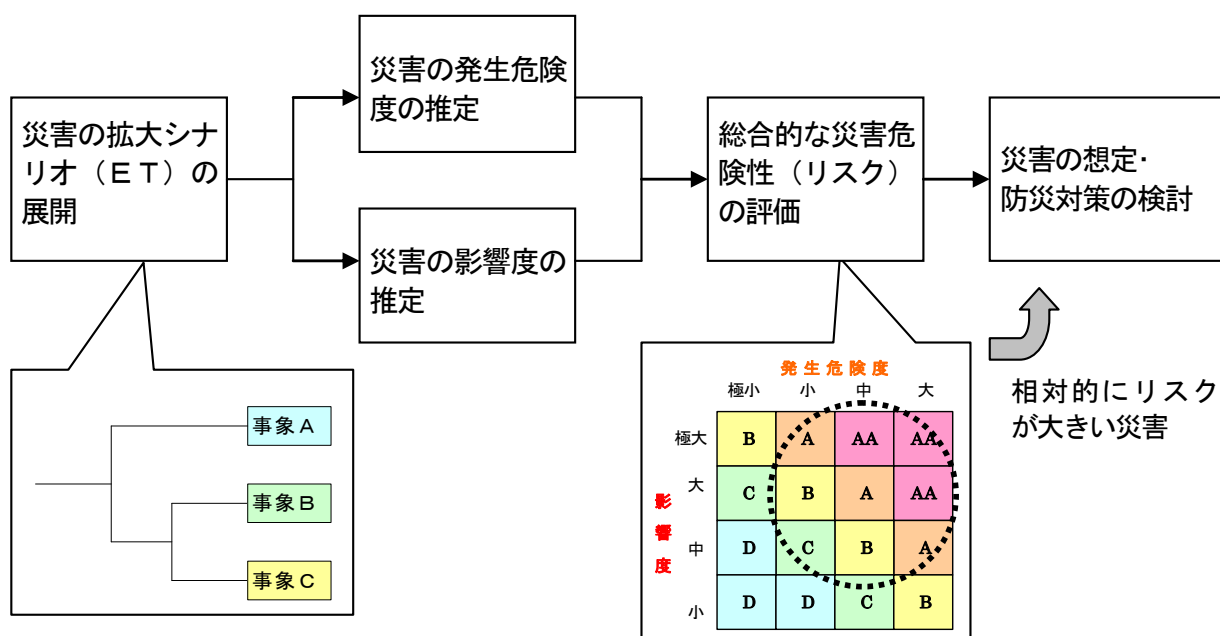


図 2.1 防災アセスメントにおけるリスク評価の基本概念

### (3) 確率的な評価手法

#### ア. イベントツリー解析

災害の発生危険度に関しては、確率的な安全性評価手法の1つであるイベントツリー解析（Event Tree Analysis：ETA）を適用する。この手法は、事故の発端となる事象（初期事象）を見い出し、これを出発点として事故が拡大していく過程を防災設備や防災活動の成否、火災や爆発などの現象の発生有無によって枝分かれ式に展開したイベントツリー（ET：前述の災害拡大シナリオ）を作成して解析するものである。この ET に初期事象の発生頻度（あるいは確率）と事象の分岐確率を与えることにより、中間や末端に現われる災害事象がどの程度の頻度（あるいは確率）で起こりうるかを算出することができる。イベントツリーの概念を図 2.2 に示す。

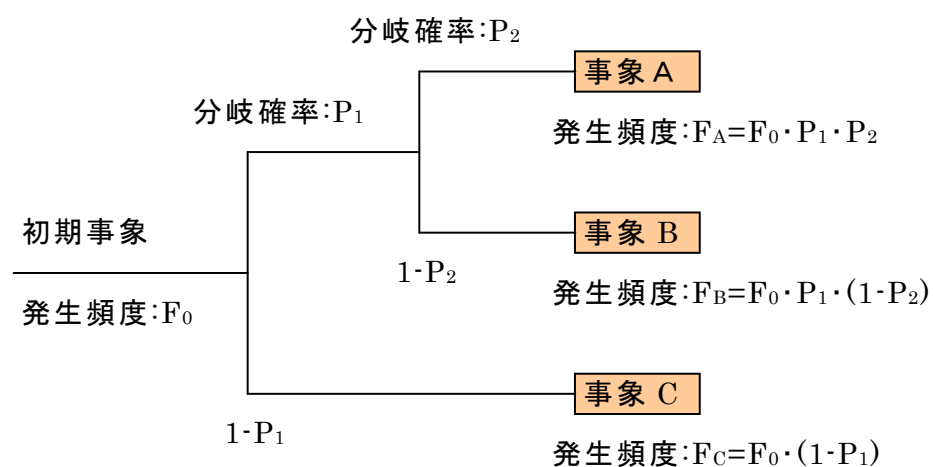


図 2.2 イベントツリーの概念図

#### イ. フォールトツリー解析

ETA における事象分岐確率（防災設備の作動失敗）の推定には、可能な範囲でフォールトツリー解析（Fault Tree Analysis：FTA）と呼ばれる手法を用いる。この手法は、例えば「故障の発生」といった事象を頂上事象として設定し、その発生原因を機器・部品レベルまで次々と掘り下げ、原因とその結果を論理記号（AND・OR）で結びつけてツリー状に表現するものである。フォールトツリーの概念を図 2.3 に示す。



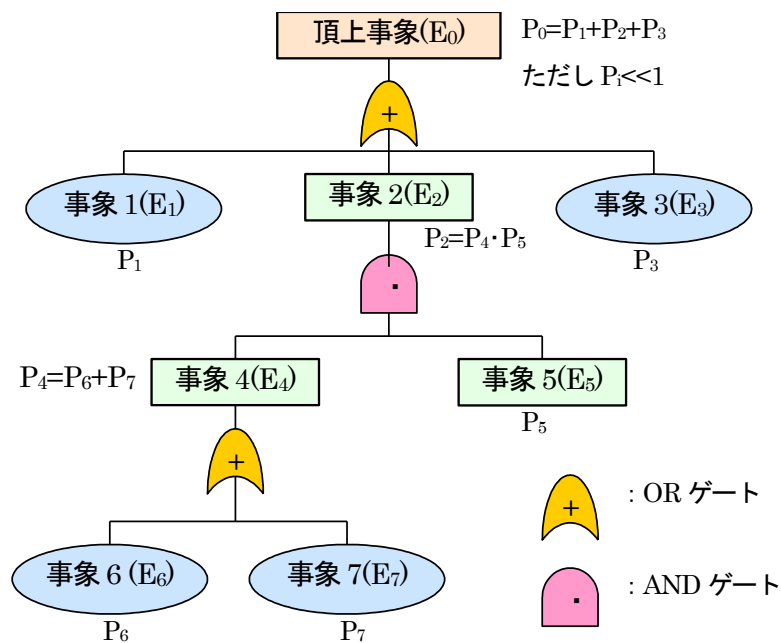


図 2.3 フォールトツリーの概念図

#### ウ. リスクマトリックス

リスクを発生危険度と影響度を掛け合わせた数値として評価することが難しい場合、あるいはなじまない場合には、図 2.4 に示すような、片方の軸に発生危険度、もう一方の軸に影響度をとったリスクマトリックスにより評価する方法が用いられる。発生危険度と影響度のカテゴリ化(区分化)は評価の対象や目的によって任意に設定することになる。

被害の大きさ	大	リスク 中	リスク 大	リスク 極 大
	中	リスク 小	リスク 中	リスク 大
	小	リスク 極 小	リスク 小	リスク 中
		小	中	大
		発生頻度(確率)		

図 2.4 リスクマトリックスの概念図

## 2.3 評価のレベル（評価の細かさ）

この指針に基づいた防災アセスメントは、都道府県が所管する石油コンビナート全域を対象とするため、主要な施設に限ったとしても相当数の施設を評価する必要がある。これらの施設は細かく見ればすべて異なり、したがって災害拡大シナリオ、あるいは初期事象の発生頻度や事象の分岐確率は個々の施設によってすべて異なる。例えば、製造プラントの潜在危険性の決定要因となりうる規模や構造、取扱物質の種類やプロセス条件などは1つ1つ異なり、ほとんど同じように見える石油タンクでも貯蔵物質の腐食性、配管の材質や太さなどによって漏洩事故の発生頻度は異なってくるであろう。

しかし現実問題として、数多くある施設の1つ1つに対してこのような細かい要因を取入れてETAによる確率的評価を行うことは困難である。したがって、本防災アセスメントを実施するにあたっては、災害の発生や拡大の様相がある程度共通とみなせるような施設群をひとまとめにしたマクロな評価を行うことになる。ただし、災害の影響度は、個々の施設の位置やプロセス条件（取扱物質の性状、貯蔵量や滞留量、取扱の温度、圧力、相など）によって決まるため、可能な範囲でこれらを反映して評価する必要がある。

このようなことから、本防災アセスメントを行った結果として石油コンビナート周辺地域が無視できない頻度で災害による重大な影響を受ける恐れがあり、かつ発災時の応急対応が困難な場合には、必要に応じて影響元となる特定の施設を対象としたさらに詳細な防災アセスメントを実施し、この結果をもとに施設の安全強化対策を検討することが望ましい。この意味で、本防災アセスメントは主として行政が行うべき防災対策の重点事項を洗い出すための基礎的な評価であり、これにより直ちに事業所に多額のコストを要するハード対策を要求するものではない。

## 2.4 評価にあたっての留意点

本防災アセスメントの確率的リスク評価においては、災害の発生危険度と影響度の推定が評価の主要な部分を占める。

災害の発生危険度に関しては、ETAにより災害事象の発生頻度を算出する原理は簡単である。しかし、前提となる初期事象の発生頻度と事象の分岐確率を与えるためには過去の事故データや機器の信頼性データが必要になり、現在わが国においてはこれら（特に信頼性データ）が十分に整備されているとはいえない。また、初期事象によっては過去にほとんど発生していないものもある。本指針では、事象発生頻度や分岐確率の推定方法とともに、現状で入手可能な国内外のデータソースと独自に収集したデータを示したが、石油コンビナートに存在する多種多様な施設の評価を行うにはとても十分とはいえず、専門家の主観的な判断に頼るところが大きい。

このような状況で実施した防災アセスメントにより得られる災害発生危険度の信頼性には問題があるといわざるを得ない。しかし、絶対的な頻度としてではなく、同一の基準のもとで判断した相対的な指標として解釈すると意味がある。このことは、例えば発生頻度が $10^{-3}$ の事象に比べて $2 \times 10^{-3}$ の事象は多少（2倍くらい）起こりやすく、 $10^{-2}$ の事象はかなり（10倍くらい）起こりやすいとして解釈することをいう。このような解釈を前提に石油コンビナートで起こりうる災害の発生危険度を定量的に評価し、講ずるべき防災対策の優先度を検討することは十分に有意義なことである。

一方、災害の影響度に関しては、災害現象に伴う物理的作用を解析するためのモデルの研究が進んでおり、発生危険度の推定よりも容易であるといえるが、災害現象によっては算定できないものもある。本指針では、比較的簡易に適用できるいくつかのモデルを一例として示したが、これ以外にも国内外の研究者や研究機関によって数多く提案されており、災害現象を厳密に解析できるシミュレーションソフトウェアもパッケージとして出されている（多くのものは有償であるが、米国環境保護庁（EPA）および米国海洋大気庁（NOAA）が開発した ALOHA（[参考] 参照）のように無償で入手できるものもある）。したがって、これら国内外の多くのモデル、さらに今後の新しい知見も含めた広い視野で検討を行い、想定される災害現象によく適合するものを選定して適用することが望ましい。

#### **[参考] ALOHA（日本語版）**

米国環境保護庁（EPA）及び米国海洋大気庁（NOAA）が開発した影響解析ソフトウェアであり、可燃性物質や毒性物質の拡散、火災、爆発の影響を評価することができる。100 種類を超える化学物質の物性データが登録されている。ガス拡散解析は、空気と同程度の密度のガスを想定した「ガウス拡散モデル」と、空気よりも重いガスを想定した「重い気体の拡散モデル」があり、選択が可能である。

**概要及び入手先：経済産業省 ホームページ**

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/cwc/link.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/cwc/link.html)

## 第3章 対象施設・地震の想定

### 3.1 対象施設

#### (1) 対象施設の選定

石油コンビナートには、多種多様な数多くのタンクやプラントなどの施設が存在し、現実問題としてこれらすべてを対象として評価を行うことは困難である。また、これらの施設の中には、事故が発生しても周囲への影響がほとんど問題にならないような小規模なものも多く含まれるであろう。そこで、評価を行う前に、まず対象とする石油コンビナートに存在する可燃性物質や毒性物質などを取り扱う施設を把握し、評価対象とする潜在危険性が大きい施設を選定する必要がある。選定にあたって考慮すべき要因は次のとおりである。

##### ① 取り扱う危険物質の量

可燃性物質や毒性物質などの危険物質を大量に貯蔵・処理している施設は潜在危険性が大きく、事故が発生した場合には大きな災害に拡大する可能性がある。したがって、貯蔵・処理する危険物質の量（滞留量）が施設の選定を行うときの第1条件となる。

##### ② 取り扱う危険物質の性状

引火点が低い物質、燃焼エネルギーが大きい物質、毒性が強い物質などを貯蔵・処理している施設では、滞留量は少なくても事故により周囲に大きな影響を与える可能性がある。したがって、このような施設は比較的小規模なものでも評価対象とする必要がある。

##### ③ 危険物質の処理条件

コンビナート等保安規則で定められる特殊反応設備、あるいは可燃性物質を高温・高圧で処理している石油精製プラントや石油化学プラントなどでは、滞留量は少なくても事故の発生危険度が高く、また発生したときの影響も大きくなる可能性がある。したがって、危険物質の滞留量と性状だけでなく処理条件も考慮して施設の選定を行うことが望ましい。

##### ④ 石油コンビナート区域外の一般地域・施設との位置関係

石油コンビナートの中にあっても区域外の居住地域や不特定多数利用施設などに比較的近い施設は、小規模なものでも事故による影響が大きくなる可能性があり評価対象として選定する必要がある。

##### ⑤ 地震に対する脆弱性

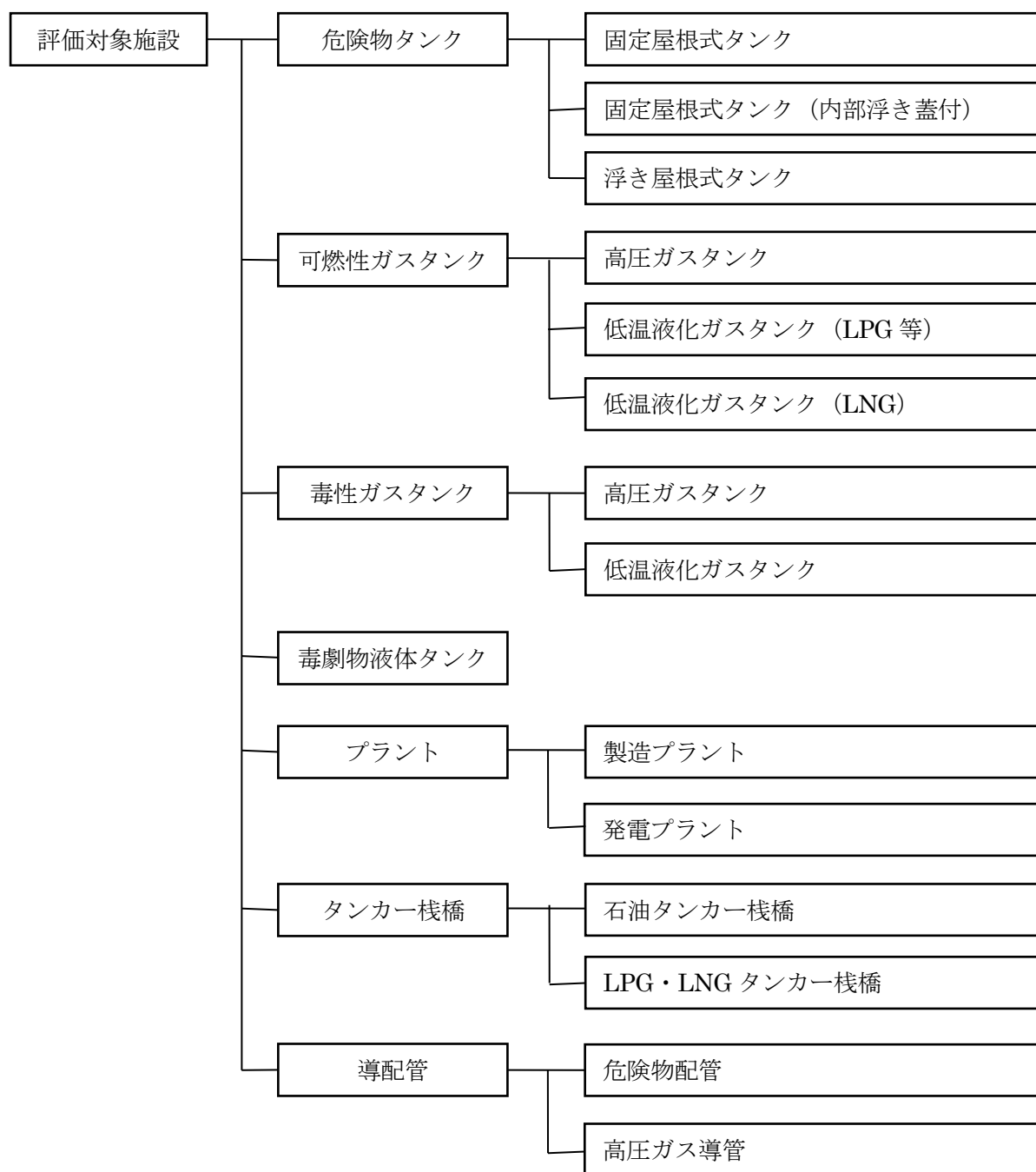
地震時の防災アセスメントを行う場合には、地震に対する施設の脆弱性を考慮する必要がある。例えば、兵庫県南部地震で比較的地震に弱いとされた 500kℓ以上 1,000kℓ未満の屋外タンク貯蔵所（準特定タンクで特に平成 11 年の新基準に適合していないもの）などは評価対象とすべきである。施設数が多い場合には、火災になりやすい低引火点の危険物、あるいは毒性の強い危険物を貯蔵したものを選定する（屋外タンク貯蔵所は以下「危険物タンク」と呼ぶ）。

防災アセスメントの実施にあたっては、上記のような項目に関して地域の実態に応じた適切な条件を設定し、評価対象とする施設の選定を行う。

## (2) 対象施設の区分

選定した施設に対して、災害の発生・拡大シナリオを展開し、ETAによる確率的リスク評価などを行うことになる。選定後においても相当数の施設が対象となり、1つ1つに対してこのような評価を行うことは困難である。このような場合には、選定した施設を災害の発生と拡大の様相がある程度共通とみなせるいくつかのグループに分け、それぞれのグループ内では個々の施設の細かい違いまでは考慮せずにひとまとめにして評価を行う。

石油コンビナートに存在する主な施設についてグループ化を行った例を図 3.1 に示す。ただし、施設によってはさらなる構造の違いなどを考慮した細分を行い評価する必要性が生じてくることもある。特に地震時においては、施設の強度（構造基準）を考慮することが望ましい。



注)「毒劇物液体タンク」とは危険物や高圧ガスに該当しない不燃性の液体を貯蔵したタンクをいう。防災アセスメントでは、漏洩したときに蒸発・拡散により周辺に影響を及ぼす可能性があるものが対象になる。

図 3.1 石油コンビナートにおける主な施設の区分例

### 3.2 地震の想定

地震時の防災アセスメントを実施するにあたって、石油コンビナートに次の被害を及ぼす地震を想定し、地震動の強さや津波浸水深を把握する必要がある。これらの被害を及ぼす想定地震は、地域によって同一の場合と異なる場合がある。

- 短周期地震動による被害 → 計測震度、液状化危険
- 長周期地震動による被害 → 地震波形（応答スペクトル）
- 津波による被害 → 津波浸水深

巨大地震の発生を考えた場合、石油コンビナートの防災計画は、災害が石油コンビナートの区域外に影響を及ぼす可能性や、市街地における同時多発災害による影響（対応力不足等）を念頭に置いて策定しておく必要があることから、地域防災計画と石油コンビナート等防災計画との整合性を考慮する必要がある。したがって、地域防災計画において想定される地震・津波の中で、石油コンビナートに最大の影響を及ぼす地震・津波を想定することを原則とする。

ただし、地域防災計画で想定する地震は都道府県全域を対象としたものであることから、これらが石油コンビナートに大きな影響を及ぼさないこともあり得る。このような場合には防災アセスメントにおいて独自に地震の想定を行うことが望ましい（短周期地震動に関して）。この場合、次のような方法がある。

- 石油コンビナート直下の地震を想定する。内閣府中央防災会議では、例えば首都直下地震の専門調査会の中で、どこでも起こり得る地震として、**M6.9** の震源を主要都市の直下に置いて被害想定を行っている。これと同じ考え方で **M6.9** の震源を直下において石油コンビナートの地震動を推定する。
- 文部科学省地震調査研究推進本部は確率論的地震動予測地図<sup>1)</sup>を作成・公開している。このなかで、30年3%、50年5%、50年2%といった低頻度の強い地震動を想定する。

### 第 3 章 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>)



## 第4章 災害の発生・拡大シナリオの展開

対象とする石油コンビナート施設において、平常時及び地震時（短周期地震動、長周期地震動及び津波）に考えられる災害の発生・拡大シナリオをイベントツリー（ET）として表現する。そのときの手順は次のとおりである。

- ① 初期事象の設定
- ② 事象分岐の設定
- ③ イベントツリーの展開

以下に主要な施設におけるシナリオの展開例を示す。ここでのシナリオは、考え得るものをできる限り挙げており、可能性が極めて小さいと思われる初期事象や事象分岐も含まれている。また、これらのシナリオに現れるすべての災害事象に対して、確率的なリスク評価や定量的な影響評価が行えるわけではない。

ここで示すシナリオはあくまで例であり、シナリオによってはそれぞれの石油コンビナートの特性や立地条件を反映し、さらに具体的に展開すべきものもある。なお、ここで取り上げていない施設や初期事象が問題になる場合には以下のシナリオを参考にして独自に展開されたい。

### 4.1 初期事象の設定

災害の発生・拡大シナリオを展開するにあたって、まず対象施設において平常時や地震時に発生すると考えられる初期事象を設定する。その場合、原則として災害のはじまりとなるプロセス内容物（可燃性物質や毒性物質）の漏洩、あるいは火災や爆発といったいわゆる「事故」の発生を初期事象として設定することが適切である。これらの現象が発生した場合には事故として報告されており、ETAによる確率的なリスク評価を行う場合に発生頻度を推定することが容易になる。

漏洩や火災などは、平常時においては施設内の装置・機器の損傷や運転時の人為ミスが原因となって発生する。さらに装置・機器の損傷は、腐食や劣化、設計や施工の不良などが原因となる。しかし、このようなより根本的な事象を初期事象とすると、ETAを行うときの頻度推定が難しいだけでなく、必要以上に煩雑になり好ましいとはいえない。また、災害拡大の様相は破損の発生箇所や開口の大きさによっても異なってくる。例えば、タンクの配管が破損した場合と本体が破損した場合では機能する防災設備は異なり、本体が破損した場合でも開口部が小さいときと大きいときでは拡大の様相は異なってくるであろう。

このようなことを考慮した主要施設の初期事象設定例を表4.1に示す。ここで、「小破」と「大破」は明確に区分できるものではなく、災害想定を行ううえで便宜的に設定するものである。また、タンク本体の破損は、大量流出につながる恐れのある底部の破損を考え、配管に付けられた緊急遮断弁あるいは受払元弁よりタンク側の破損はタンク本体に含めて考える。

表 4.1 主要施設における初期事象の設定例

発生要因	施設種別	初期事象
平常時の事故	危険物タンク	配管の小破による漏洩
		タンク本体の小破による漏洩
		配管の大破による漏洩
		タンク本体の大破による漏洩
		浮き屋根シール部での出火（浮き屋根式）
		タンク屋根での出火（固定屋根式）
	可燃性ガス タンク	配管の小破による漏洩
		タンク本体の小破による漏洩
		配管の大破による漏洩
		タンク本体の大破による漏洩
	製造プラント	装置の小破による漏洩
		装置の大破による漏洩
短周期地震動 (強震動・液状化)	危険物タンク	配管の小破による漏洩
		タンク本体の小破による漏洩
		配管の大破による漏洩
		タンク本体の大破による漏洩
	可燃性ガス タンク	配管の小破による漏洩
		タンク本体の小破による漏洩
		配管の大破による漏洩
		タンク本体の大破による漏洩
	製造プラント	装置の小破による漏洩
		装置の大破による漏洩
長周期地震動	危険物タンク	浮き屋根上への漏洩（浮き屋根式）
		浮き屋根の破損・沈降（浮き屋根式）
		タンク中のドレン配管の破損（浮き屋根式）
		タンク上部の破損（固定屋根式）
		浮き蓋の損傷・沈降（内部浮き蓋付）
津波	危険物タンク	配管の破損による漏洩
		タンクの移動・転倒による漏洩
		地震による流出後の津波
	可燃性ガス タンク	配管の破損による漏洩
		タンクの移動・転倒による漏洩

## 4.2 事象分岐の設定

石油コンビナートの事業所や各施設には、事故（初期事象）が発生したとき、これが災害に拡大していくことを防止するための各種の防災設備や防災体制が整備されている。したがって、これらを事象の分岐として ET に取り入れて災害拡大シナリオを展開し、出現し得る災害事象を抽出することになる。施設に設けられた防災設備は、すべてが事故による損失防止のために重要な役割を持つものであるが、防災アセスメントの目的を考慮して、災害の拡大様相に大きく影響を与えるものだけを取り入れて評価することが好ましい。このような事象の分岐として、例えば表 4.2（危険物タンクの流出事象）、表 4.3（可燃性ガスタンク）、表 4.4（製造プラント）に示すようなものがある。各表には、初期事象によって機能するものに○を記している。

表 4.2 事象分岐の設定例（危険物タンクの流出事象）

事象分岐	配管の小破	本体の小破	配管の大破	本体の大破
緊急遮断	○		○	
バルブ手動閉止	○			
一時的な流出拡大防止	○	○		
緊急移送	○	○		
仕切堤	○	○	○	
防油堤	○	○	○	○
着火（有／無）	○	○	○	○

注 1) 「緊急遮断」は、遠隔操作による緊急遮断弁または元弁の閉止を意味する。

注 2) 「一時的な流出拡大防止」は、土嚢で囲って回収するなどの一時的な措置で、「小破」の場合には機能すると考えられる。

注 3) タンクによっては該当設備がないものもある（緊急遮断や仕切堤など）。

表 4.3 事象分岐の設定例（可燃性ガスタンク）

事象分岐	配管の小破	本体の小破	配管の大破	本体の大破
緊急遮断	○		○	
バルブ手動閉止	○			
緊急移送	○	○		
防液堤			○	○
着火（有／無）	○	○	○	○

表 4.4 事象分岐の設定例（製造プラント）

事象分岐	装置の小破	装置の大破
緊急停止・遮断	○	○
緊急移送 （内容物処理）	○	
着火（有／無）	○	○

#### 4.3 イベントツリーの展開

ある事象が、防災設備の成否などにより2つの事象に分岐する。この操作を、図 4.1 に示すように、初期事象からスタートして繰り返すことでETを展開していく。

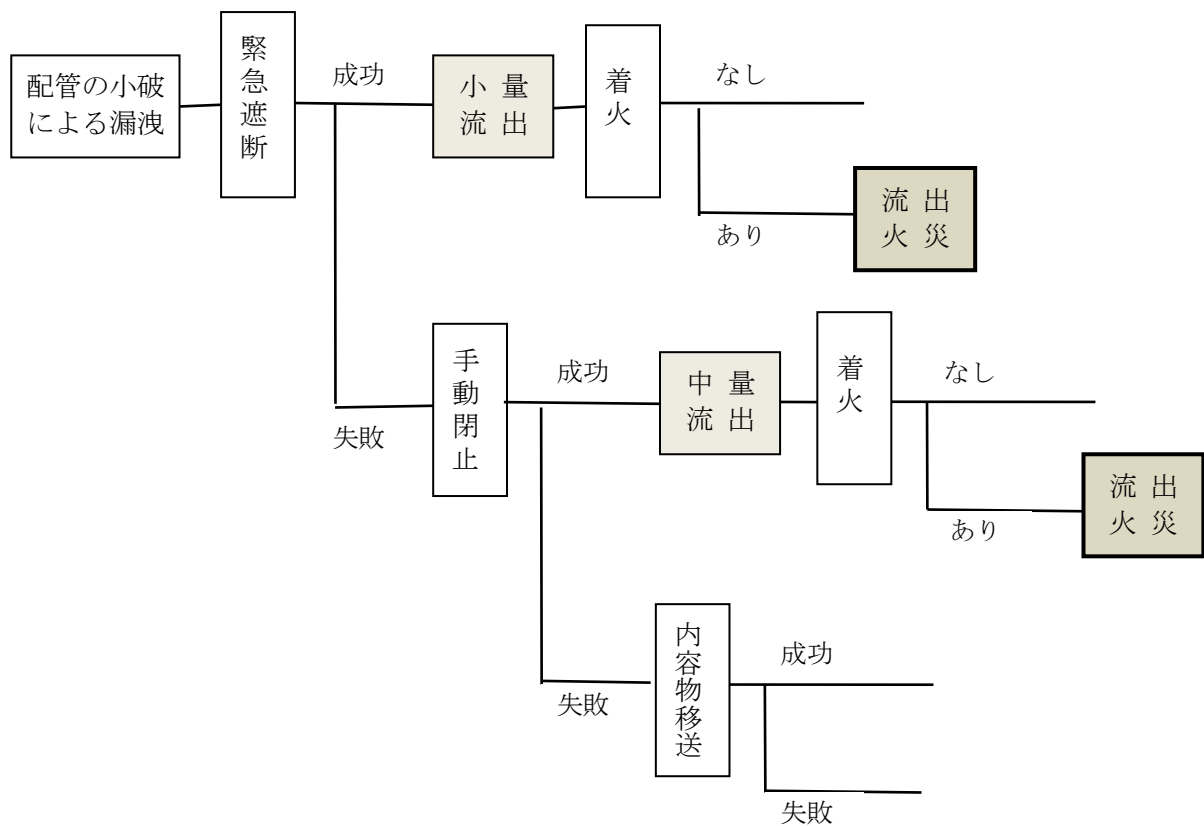


図 4.1 イベントツリー展開の概念図

表 4.1 の各初期事象について、ET の展開例を「参考資料1 災害の発生・拡大シナリオの一例」に示す。ここでは、例えば危険物タンクであれば、すべての施設で共通と考えられる初期事象から防油堤火災に至る「単独災害のシナリオ」と、個々のタンクの立地条件に依存するその後の防油堤外への流出、あるいは延焼拡大といった「大規模災害のシナリオ」を分けて考える。

#### 4.3.1 単独災害のシナリオ

##### (1) 平常時の事故

###### ア. 危険物タンク

- 配管の小破による漏洩 → ET 図 1－1
- タンク本体の小破による漏洩 → ET 図 1－2
- 配管の大破による漏洩 → ET 図 1－3
- タンク本体の大破による漏洩 → ET 図 1－4
- 浮き屋根シール部の損傷・漏洩（浮き屋根式）→ ET 図 1－5
- タンク屋根板の損傷（固定屋根式）→ ET 図 1－6

ここでのシナリオは、危険物タンクでの災害事象として、流出火災及びタンク火災（いわゆる液面火災）を前提として展開している。危険物の中には、例えばアクリロニトリルのように毒性が強いものもあり、このような物質を貯蔵するタンクを対象とする場合には、毒性蒸気の拡散も考慮に入れる必要がある。

###### イ. 可燃性ガスタンク（高圧ガスタンク）

- 配管の小破による漏洩 → ET 図 2－1
- タンク本体の小破による漏洩 → ET 図 2－2
- 配管の大破による漏洩 → ET 図 2－3
- タンク本体の大破による漏洩 → ET 図 2－4

上記のETでは、災害事象を「爆発・火災」といったひとくくりに表しているが、可燃性ガスが漏洩した場合、着火のタイミングによって図 4.2 に示すような様々な燃焼形態をとる（貯蔵物質や貯蔵状態によっても異なる）。さらに漏洩が止まらない場合や液化ガスが大量に漏洩した場合には、爆発したあと噴出火災や液面火災となって長時間継続することになる。それぞれの燃焼形態によって周囲への影響のしかたは異なり、影響評価（後述）を行うときにはこのようなことも考慮する必要がある。

なお、塩素やアンモニアなどの毒性ガスタンクの場合も、基本的には可燃性ガスと同様である。事象分岐としては、拡散防止のための水幕設備や除害設備を考慮する必要があるが、大破漏洩の場合はほとんど機能しないと考えられる。また、災害事象は「火災・爆発」の代わりに「毒性ガス拡散」となり、災害拡大シナリオは次のようになる。

- 配管の小破による漏洩 → ET 図 2－5
- タンク本体の小破による漏洩 → ET 図 2－6
- 配管の大破による漏洩 → ET 図 2－7
- タンク本体の大破による漏洩 → 同上（緊急遮断失敗の経路をたどる）

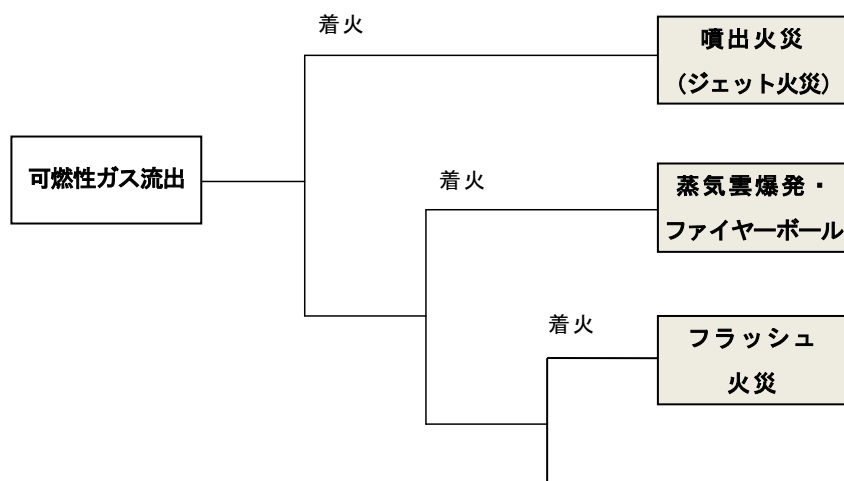


図 4.2 可燃性ガスの燃焼形態

## ウ. 製造プラント

製造プラントには、石油精製プラント、石油化学プラント、高圧ガス製造プラントなどがあり、石油類や高圧ガスの取扱量、プラント内の反応プロセスは多種多様である。これらの中には、著しい発熱反応を伴うもの、副次的な反応による爆発危険性を伴うものもある。

一般的な製造プラントは、反応器や貯槽といった塔槽類、加熱炉や熱交換器といった関連機器、及びこれらをつなぐ配管系などから構成される。これらのなかで、可燃性物質（あるいは毒性物質）が大量に滞留する塔槽類を代表的装置として取り上げ、操業中に起こり得る事象を初期事象として取り上げる。

製造プラントで漏洩が発生した場合、緊急遮断により発災箇所のブロック化を図り、内容物をブローダウン設備やフレアスタック、ベントスタックに送って安全に処理を行うことになる。これらのことを考慮した ET は次のようになる。

- 装置の小破による漏洩 → ET 図 3-1
- 装置の大破による漏洩 → ET 図 3-2

ここでも、災害事象は「爆発・火災」といったひとくくりに表すが、石油類が漏洩したときには液面火災、可燃性ガスが漏洩したときには図 4.2 のような燃焼形態をとる。また、製造プラントには、硫化水素などの毒性物質を取り扱っているものもあり、このような施設に対しては着火して爆発・火災に至らなくても毒性ガスの拡散により周囲に影響を及ぼす恐れがある。

## (2) 短周期地震動による被害

地震時の短周期地震動による災害の発生・拡大シナリオは、初期事象の発生要因は異なるものの、発生後の拡大の様相（シナリオ）は同じと考えられる。ただし、短周期地震動の影響で、危険物タンクの「浮き屋根シール部での出火（浮き屋根式）」と「タンク屋根での出火（固定屋根式）」はほとんど起こり得ないと考えられるため除いた。

#### ア. 危険物タンク

- 配管の小破による漏洩 → ET 図 1－1
- タンク本体の小破による漏洩 → ET 図 1－2
- 配管の大破による漏洩 → ET 図 1－3
- タンク本体の大破による漏洩 → ET 図 1－4

#### イ. 可燃性ガスタンク（高圧ガスタンク）

- 配管の小破による漏洩 → ET 2－1
- タンク本体の小破による漏洩 → ET 図 2－2
- 配管の大破による漏洩 → ET 図 2－3
- タンク本体の大破による漏洩 → ET 2－4

#### ウ. 製造プラント

- 装置の小破による漏洩 → ET 図 3－1
- 装置の大破による漏洩 → ET 図 3－2

#### (3) 長周期地震動による被害

十勝沖地震（2003）では、長周期地震動によって危険物タンクの浮き屋根損傷や沈降に伴うタンク火災のほか、固定屋根式タンクの側板と屋根接合部を突き破って溢流した事例、浮き屋根上に流出した油がドレン配管を通して外に流出した事例が見られた。また、東日本大震災においても、火災には至っていないが、浮き屋根の損傷（沈降も含む）や内部浮き蓋の損傷が発生している。このような危険物タンクのスロッシング被害に関する ET は次のようになる。

- 浮き屋根上への漏洩（浮き屋根式） → ET 図 4－1
- 浮き屋根の破損・沈降（浮き屋根式） → ET 図 4－2
- タンク中のドレン配管の破損 → ET 図 4－3
- タンク上部の破損 → ET 図 4－4
- 浮き蓋の損傷・沈降 → ET 図 4－5

#### 4.3.2 大規模災害のシナリオ

ここでいう「大規模災害」は、石油類の流出が防油堤外さらには事業所外に拡大していくような場合、石油類や可燃性ガスの火災・爆発が隣接施設を損傷してさらなる爆発・火災を誘発して拡大していくような場合である。具体的には、東日本大震災で見られた LPG 爆発火災のような災害であり、平常時には絶対に起こらないとは言えないが、大規模地震時に起こり得る災害と考えてよい。

このような災害のシナリオは、前述した単独災害の「大破漏洩」の初期事象から連続的につながるものであるが、拡大の様相や周囲への影響は発災元の施設、あるいは事業所や石油コンビナートの立地環境に依存するため、単独災害とは分けて評価を行うものとする。対象とする施設は、可燃性物質を大量に貯蔵した危険物タンクや可燃性ガスタンクとし、ET は概ね次のようになる。ここでは、石油類や可燃性ガスが防油堤内、防液堤内に大量に流出するような事象を便宜上の初期事象

としている。

#### ア. 危険物タンク

- 防油堤から海上への流出 → ET 図 5－1
- 防油堤火災からの延焼拡大 → ET 図 5－2

#### イ. 可燃性ガスタンク（高圧ガスタンク）

- BLEVE（7.2 項参照）による延焼拡大 → ET 図 5－3

### 4.3.3 津波による災害のシナリオ

東日本大震災では、これまで経験したことがないような巨大な津波に襲われ、特に岩手県、宮城県の太平洋側では、多くの人的被害とあわせて危険物施設や高圧ガス施設に大きな被害が出た。また、福島県から茨城県の太平洋側でも津波の来襲はあったが、石油コンビナートに関しては、被害はバースの損壊など護岸部周辺にとどまっている。ここでは、潜在危険性が大きく大規模災害につながる可能性がある石油タンクと高圧ガスタンクを取り上げ、津波に伴う災害拡大シナリオの検討を行う。津波による被害は、波力や浮力による施設の破損、漂流物の衝突による施設の破損、地震による流出後の津波来襲が考えられるが、いずれも大破や大量流出による大規模災害に至るケースを前提とする。ET 例は概ね次のようになる。

#### ア. 危険物タンク

- 配管の破損による漏洩 → ET 図 6－1
- タンクの移動・転倒による漏洩 → ET 図 6－2
- 地震による流出後の津波 → ET 図 6－3

#### イ. 可燃性ガスタンク（高圧ガスタンク）

- 配管の破損による漏洩 → ET 図 6－4
- タンクの移動・転倒による漏洩 → ET 図 6－5

### 4.4 各シナリオの評価方針

本章で示した災害の発生・拡大シナリオの評価方針は以下のとおりである。具体的な評価の手順、手法については次章以下に示す。

#### (1) 平常時の事故（単独災害）

確率的なリスク評価を行う（→ 第 5 章）。

#### (2) 短周期地震動による被害（単独災害）

確率的なリスク評価を行う（→ 第 5 章）。



### **(3) 長周期地震動による被害（単独災害）**

長周期地震動の特性（速度応答スペクトル）と個々の危険物タンクのスロッシング固有周期に基づいてスロッシング波高を推定し、さらにこれをもとに溢流量の推定、流出火災やタンク火災の可能性と影響評価等を行う（→ 第6章）。

### **(4) 大規模災害**

影響算定が可能な災害事象については、発生確率には言及せずに影響評価のみを行う。影響算定が困難な災害については、立地条件等を反映した具体的な災害拡大シナリオを展開し、必要な防災対策を確認する（→ 第7章）。

### **(5) 津波による災害**

危険物タンクについては、消防庁が開発した簡易ツールにより「浮き上がり」と「滑動」の可能性を判定し、これをもとに流出量の想定を行う。流出後の拡大、また高压ガスタンク等の被害については、東日本大震災での被害事例に基づいて、立地条件等を考慮したうえで必要な防災対策を確認する（→ 第8章）

## 第5章 確率的なリスク評価

平常時の事故、短周期地震動による被害（単独災害）については、以下に示す手順、手法により確率的なリスク評価を行い、防災計画策定において想定すべき災害を抽出する。

確率的なリスク評価の手順は次のとおりである（第2章の図2.1）。

- 災害の発生危険度の推定
- 災害の影響度の推定
- 総合的な災害危険性（リスク）の評価・想定災害の抽出

このような評価手順は、平常時の事故、短周期地震動による被害のいずれも同じであるが、災害の発生危険度の推定方法は両者で異なってくる。

### 5.1 災害の発生危険度の推定

#### 5.1.1 平常時の災害発生危険度

##### (1) 初期事象の発生頻度

平常時における初期事象の発生頻度は、原則として過去の事故データに基づいて推定する。データが得られない場合には専門的判断により仮定することになるが、できるだけ広範囲にデータを収集してこれらに基づいて推定することが望ましい。なお、ここでいう「専門的判断」とは、石油コンビナート施設の設計、運転、安全管理、あるいは化学プロセスのリスクアセスメントなどに携わる専門家の経験や主観に基づいた判断のことである。

#### ア. 事故データによる発生頻度の推定

##### ① 発生頻度の推定に必要なデータ

初期事象（事故）の発生頻度を推定するためには、基本的に該当事象の発生件数を把握するための事故データと、母数となる施設数を把握するための施設データが必要になる。現状で入手可能な主なデータソースには次のようなものがある。

- 危険物に係る事故事例（消防庁・各年）

消防法で定められた全国の危険物施設で発生したすべての事故1件1件の発生状況や被害状況を掲載した事例集

- 石油コンビナート等特別防災区域の特定事業所における事故概要（消防庁・各年）

石油コンビナート内の危険物施設、高圧ガス施設などで発生した事故の全体概要をまとめたもの。

- 高圧ガス事故事例検索システム（高圧ガス保安協会）

高圧ガス保安法で定められた全国の高圧ガス施設などで発生した事故1件1件の概要を掲載。

- 危険物規制事務統計表（消防庁・各年）

消防法で定められた全国の危険物施設に関する統計書で施設数を把握することができる。

- 石油コンビナート等防災体制の現況（消防庁・各年）

石油コンビナートの事業所や施設に関する統計書で施設数を把握することができる。

## ② 発生頻度の推定方法

石油コンビナート施設には、一般のタンクやプラントのように年間を通して運転される施設と、入出荷施設のように限られた期間だけ運転される施設がある。前者を連続運転施設、後者を不連続運転施設と呼ぶ。このような運用形態などによって発生頻度の推定方法は異なってくる。

### a. 連続運転施設における発生頻度の推定

連続運転施設に関しては、次式により発生頻度  $\lambda$  (1/年) を推定することができる。

$$\lambda = n / T \quad (\text{式 5.1})$$

ここで、 $n$  はある期間内に全国（あるいは全国の特別防災区域内）で発生した該当事故の発生件数、 $T$  は延べ運転時間で総施設数とデータ収集期間（年）の積となる。危険物タンクの初期事象に関して一例を示すと以下のようになる。

例) 危険物タンクの初期事象

- 事故件数（1989～2002 年の 14 年間）
  - ・ 配管の小破漏洩：144 件（非埋設管）
  - ・ 本体の小破漏洩：82 件
  - ・ 本体の大破漏洩：1 件
- 総施設数：約 79,000 基
- 発生頻度
  - ・ 配管の小破漏洩： $144 / (79000 \times 14) = 1.3 \times 10^{-4} / \text{年}$
  - ・ 本体の小破漏洩： $82 / (79000 \times 14) = 7.4 \times 10^{-5} / \text{年}$
  - ・ 本体の大破漏洩： $1 / (79000 \times 14) = 9.0 \times 10^{-7} / \text{年}$

推定値の信頼性は、一般に期間内の事故件数  $n$  が多くなるほど高くなる。したがって、実際に発生頻度の推定を行う場合には、できるだけ長期間のデータを用いることが望ましい。

### b. 不連続運転施設における発生頻度の推定

入出荷施設のような不連続運転施設における発生頻度は、単純に事故件数を施設数とデータ収集期間（年）で割るのではなく、施設利用率を考慮して次式により推定する。

$$\lambda = \frac{n \cdot r}{T \cdot R} \quad (\text{式 5.2})$$

ここで、 $r$  は評価対象施設の年間利用時間、 $R$  は全国の同種施設の平均利用時間である。なお連続運転施設のときと同様に、 $n$  はデータ収集間における全国の事故件数、 $T$  は施設数とデータ収集期間（年）の積である。

また、事故の発生が利用時間よりも利用頻度に依存するようなものであれば、 $f$  を評価対象施設の年間利用頻度、 $F$  を全国の同種施設の年間平均利用頻度として次式により推定する。

$$\lambda = \frac{n \cdot f}{T \cdot F} \quad (\text{式 5.3})$$

対象とする施設の利用率あるいは利用頻度が全国平均と同程度とみなせる場合は、 $r/R \sim 1$  あるいは  $f/F \sim 1$  となり、連続運転施設と同様に  $\lambda = n/T$  として推定してもよい。

### c. 点状施設と線状施設

タンクやプラントなどの通常の施設は点状の施設としてモデル化し、施設の大きさや付属配管の長さは無視して、初期事象の発生頻度はこれらに依存しないと考える。しかし、数百mあるいは数kmにも及ぶパイプライン(事業所間を結ぶ導配管)のように、点状ではなく線状の施設としてモデル化し、長さを考慮して事象発生頻度を推定したほうがよい施設もある。

このような線状施設に対しては、全国と同種施設の平均延長を  $L$ 、評価対象施設の延長を  $\ell$  として次式により発生頻度を推定する。

$$\lambda = \frac{n \cdot \ell}{T \cdot L} \quad (\text{式 5.4})$$

全国と同種施設の平均延長が把握できない場合には、対象地区内の平均延長が全国平均と同程度と見なし、 $L$  を対象地区内の同種施設の平均延長として頻度を推定する方法が考えられる。対象地区内の同種施設が少ない場合には、非常に大まかではあるが、 $\ell/L \sim 1$  として推定するしかない。

## イ. 専門的判断による発生頻度の推定

事故データにより初期事象(事故)の発生頻度を推定しようとした場合、次のようなケースに少なからず遭遇するであろう。

- 過去に同様の事象が発生していない場合
- 推定に必要なデータが入手できない場合

このような場合には、専門的判断により発生頻度を推定することになる。このとき、1つの事象だけを考えてこれがどの程度起こりやすいかを直接数値で表現しようとするとは非常に難しい。しかし、2つの事象を比較してどちらがどのくらい起こりやすいかを数値で表現することは、比較対象にもよるがある程度は可能である。したがって、ある事象の発生頻度が分かっていると、これと比較することにより他の事象の発生頻度をかなり大まかではあるが推定することができる。

### (2) 事象の分岐確率

事象の分岐確率は、先行する事象が発生したあと、2つの事象のいずれかに分岐する確率( $p$ )として設定する。他方の事象に分岐する確率は $(1 - p)$ となる。機械的な防災設備の成否に関しても、例えば緊急遮断弁の閉止という1回の作動要求に対して要求どおり作動しない確率(失敗確率)として与え、便宜的に(/demand)という単位を付けて表わすこともある。

第4章で例示したETの中に現れる各種の事象分岐に確率を設定するにあたって、現状において

は専門的判断によるところが多くなることはやむを得ず、対象とする石油コンビナートの事業所の安全管理担当職員、リスクアセスメントに関する学識経験者などの意見を聞きながら、十分に検討して妥当な値を設定する。

以下に、機械的な防災設備の成否に関して、フォールトツリー解析（FTA）による確率設定の一例を示す。これらは、現状で得られるデータをもとに、できるだけ客観性をもって分岐確率の設定を行うための参考として示したもので、実施にあたっては今後得られる新しい知見やデータを取入れていくことが望ましい。

海外では、化学プロセスを対象としたリスクアセスメントの実施を目的に装置・機器レベルの信頼性データが整備されており、これらを活用して FTA により防災設備に関する事象分岐確率を推定することができる。ただし、石油コンビナートの防災アセスメントでは個々の施設に設けられた防災設備のシステム構成を調べて反映することは困難であり、全国あるいは対象地区で標準的と考えられシステム構成を想定して解析することになる。したがって、解析可能な設備はこのような標準化が可能なものに限られてくる。

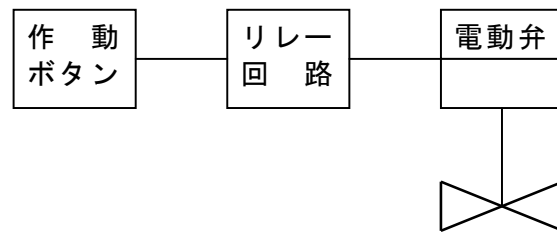
危険物タンクや高圧ガスタンクに付けられた緊急遮断弁（電動弁及び空気弁）を対象としたフォールトツリー（FT）のを図 5.1 及び図 5.2 に示す。なお、ここで参照した信頼性データは次のとおりで、いずれも米国で刊行されたものである。

○ CCPS : Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Table

(Center for Chemical Process Safety of the American Institute Chemical Engineers, 1989)

○ WASH-1400 : Reactor Safety Study, An Assessment of Accident in U.S. Commercial Nuclear Power Plants (U.S.Nuclear Regulatory Commission, 1975)

設備構成



FTA

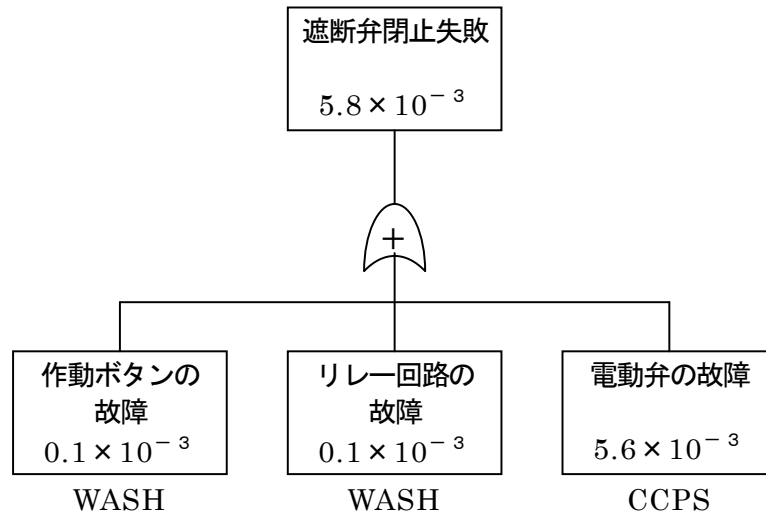
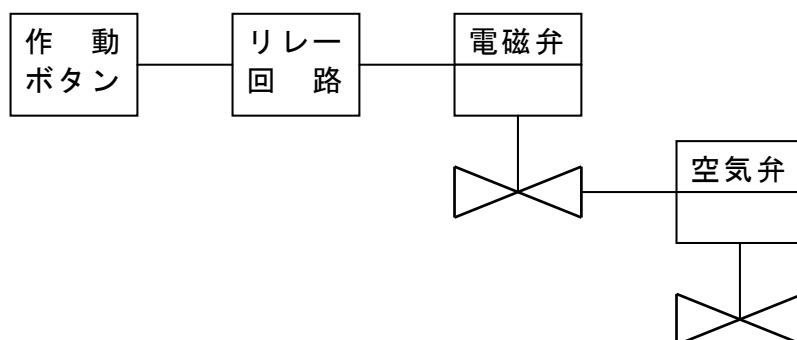


図 5.1 緊急遮断弁の不作動に関する F T 解析例（電動弁）

### 設備構成



### FTA

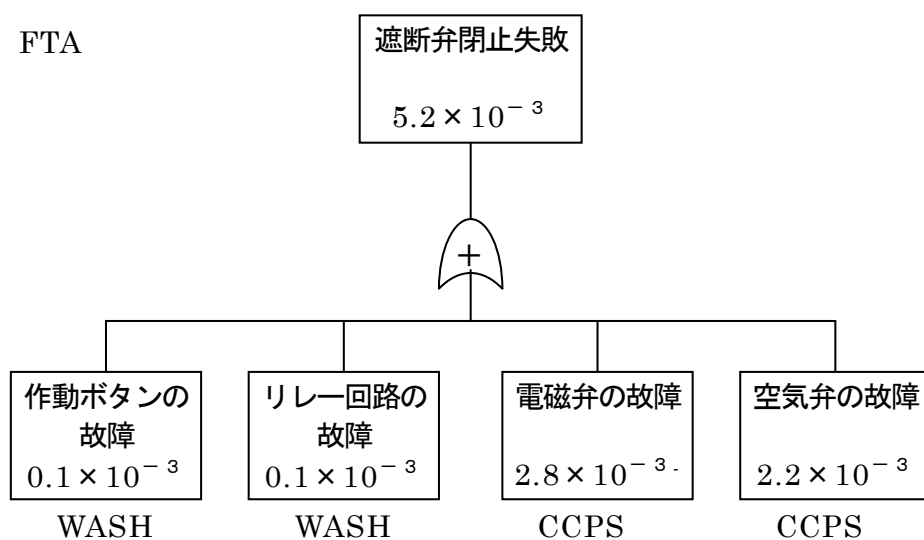
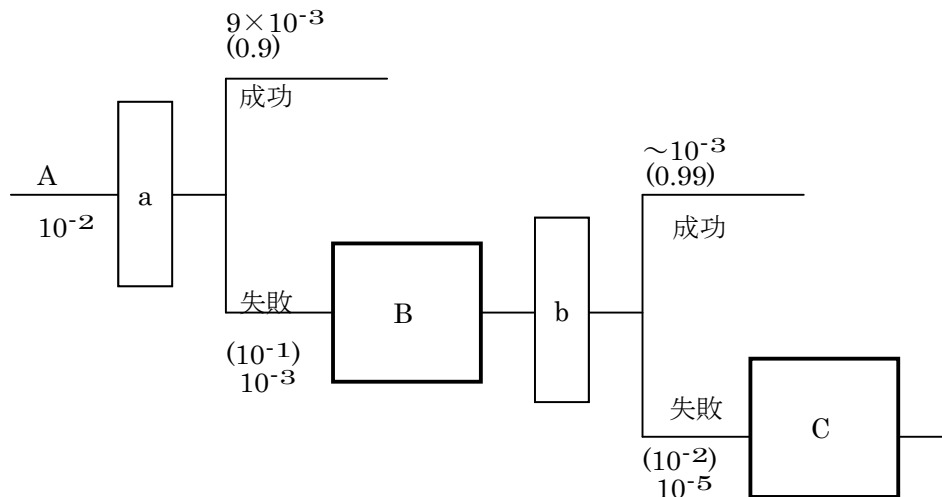


図 5.2 緊急遮断弁の不作動に関する F T 解析例（空気弁）

### (3) 災害事象の発生頻度

災害の発生危険度の推定は、第 4 章で展開したシナリオ（ET）に初期事象の発生頻度及び事象の分岐確率を与え、最終的な災害事象の発生頻度を算出することにより行う。ETA による災害発生危険度推定の考え方を図 5.3 に示す。



- 初期事象Aが  $10^{-2}$ /年の頻度で発生する。
- 防災設備 a が成功すれば災害は終息し、失敗すれば拡大して事象Bとなる。防災設備 a の失敗確率を括弧で示した  $10^{-1}$  とすると、事象Bの発生頻度は  $10^{-2} \times 10^{-1} = 10^{-3}$ /年となる。防災設備 a が成功する確率は  $1 - 10^{-1} = 0.9$  であり、災害が終息する頻度は  $10^{-2} \times 0.9 = 9 \times 10^{-3}$ /年となる。
- 続いて防災設備 b が失敗すれば災害はさらに拡大して事象Cとなる。防災設備 b の失敗確率を括弧で示した  $10^{-2}$  とすると、事象Cの発生頻度は  $10^{-3} \times 10^{-2} = 10^{-5}$ /年となる。防災設備 b が成功する確率は  $1 - 10^{-2} = 0.99$  であり、災害が終息する頻度は  $10^{-3} \times 0.99 = 9.9 \times 10^{-4}$ /年となり、近似的に  $10^{-3}$  とする。

図 5.3 ETAによる災害発生危険度推定の考え方

### 5.1.2 地震時の災害発生危険度

平常時の防災アセスメントにおいては、対象施設の災害発生危険度を1年あたりの発生頻度（/年）として表わした。地震時においては、地域防災計画との整合を図るため、想定地震の発生頻度は考慮せずに、地震が発生した時の被害確率として表すことにする。この場合、ETAの初期事象は想定地震が発生したときの施設の被害確率として与え、これをもとに得られる中間あるいは最終的な災害事象の発生確率も同じ意味を持つ。

#### (1) 初期事象の発生確率

地震による初期事象の発生確率は、想定される地震動の強さや液状化の程度、対象施設の種類や構造などによって大きく異なり、これらの要因をできるだけ考慮して推定することが望ましい。以下では、確率推定にあたっての参考として、過去の地震（阪神・淡路大震災、東日本大震災）における危険物タンク等の被害状況と、工学的な解析によって得られた危険物タンクの被害モデルについて示す。

#### ア. 阪神・淡路大震災での被害状況

阪神・淡路大震災（1995）の後、神戸市の危険物タンクを対象に実施した消防庁の調査によると、



主な被害状況は表 5.1 のようになっている<sup>1)</sup>。なお、この地震では、非常に強い地震動であったにも関わらず、大量流出などの大きな被害は発生していない。

表 5.1 阪神・淡路大震災における危険物タンクの主な被害状況

構造基準		新法タンク	旧法タンク	特定外タンク
調査対象タンク数		11	69	156
本体	漏洩	—	—	1 ( $6.4 \times 10^{-3}$ )
	亀裂	—	—	1 ( $6.4 \times 10^{-3}$ )
	側板の変形	—	2 ( $2.9 \times 10^{-2}$ )	10 ( $6.4 \times 10^{-2}$ )
	アニュラ部の変形	—	3 ( $4.3 \times 10^{-2}$ )	4 ( $2.6 \times 10^{-2}$ )
配管接続部の漏洩		—	1 ( $1.4 \times 10^{-2}$ )	6 ( $3.8 \times 10^{-2}$ )

注) 括弧内の数値は 1 施設あたりの被害率を表す (以下同様)。

表 5.1 から判断すると、被害数が少ないところもあり信頼性が高いとはいえないが、旧法タンクでは本体 (側板及びアニュラ部) の変形が  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  程度、配管からの漏洩が  $10^{-2}$  程度、また特定外タンクでは本体からの漏洩が  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  程度、本体 (側板及びアニュラ部) の変形が  $10^{-1}$  程度、配管からの漏洩が  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  程度と考えることができる。ただし、構造基準は当時のもので、「特定外」は 1,000 kℓ未満のタンクである。その後、旧法タンクは新しい耐震基準が制定され、あわせて 500 kℓ以上 1,000 kℓ未満のタンクは「準特定タンク」として耐震基準が強化されている。なお、地震動の強さは、その後の神戸地区の石油コンビナートを対象とした調査において、危険物タンクに実効的に作用した加速度が 400gal 程度であったと推定されている<sup>2)</sup>。

## イ. 東日本大震災での被害状況

東日本大震災では、市原市の LPG タンク爆発火災、仙台地区の津波による火災及び流出を除くと、石油コンビナートにおいて大きな被害は発生していない。震災後に消防庁により実施された危険物施設の被害状況調査 (以下「消防庁調査 (H23)」という)<sup>3)</sup> の結果に基づいて、この地震による製造所、危険物タンク (準特定・特定外タンク及び特定タンク)、移送取扱所の被害状況を整理したものが表 5.2～表 5.5 である。ただし、これらの被害は地震動によるもので、津波によるもの、地震動か津波かはっきりしないものは除いている。震度 6 強以上のところで被害施設がほとんどないのは、強い地震動と津波を同時に受け、津波による被害が卓越するか、どちらが原因かはっきりしないためと思われる。

表 5.2 東日本大震災における危険物製造所の被害状況

震度			5 弱	5 強	6 弱	6 強以上
施設数			267	129	57	16
被害施設	危険物を取り扱う設備	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	—	9 ( $1.6 \times 10^{-1}$ )	—
	20 号タンク	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	1 ( $7.8 \times 10^{-3}$ )	—	—
	付属配管	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	1 ( $7.8 \times 10^{-3}$ )	13 ( $2.3 \times 10^{-1}$ )	2 ( $1.3 \times 10^{-1}$ )

注 1) 施設数は H22.4.1 現在の値であり、「平成 22 年度石油コンビナート等実態調査（消防庁）」に基づく。ただし、震災時に第 2 種特定事業所として新たに指定されていた 2 事業所の施設を、平成 23 年度調査に基づき追加した（以下同様）。

注 2) 付属配管は配管支持物を含む（以下同様）。

表 5.3 東日本大震災における危険物タンクの被害状況（準特定・特定外タンク）

震度			5 弱	5 強	6 弱	6 強以上
施設数			2425	1437	524	90
被害施設	側板	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	—	—	—
	底板	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	—	—	—
	付属配管	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	9 ( $6.3 \times 10^{-3}$ )	1 ( $1.9 \times 10^{-3}$ )	—

表 5.4 東日本大震災における危険物タンクの被害状況（特定タンク）

震度			5 弱	5 強	6 弱	6 強以上
施設数			775	779	228	129
被害施設	側板	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	1 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )	—	—
	底板	漏洩	—	1 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )	—	—
		破損	—	—	—	—
	付属配管	漏洩	—	1 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )	—	—
		破損	1 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )	1 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )	—	—

表 5.5 東日本大震災における移送取扱所の被害状況

震度			5 弱	5 強	6 弱	6 強以上
施設数			291	84	43	10
被害 施設	移送配管	漏洩	—	1 ( $1.2 \times 10^{-2}$ )	—	—
		破損	—	—	14 ( $3.3 \times 10^{-1}$ )	—
	栈橋等設備	漏洩	—	—	—	—
		破損	—	—	2 ( $4.7 \times 10^{-2}$ )	—

注 1) 移送配管は配管支持物を含む。

注 2) このほかに震度が不明な事業所での漏洩が 2 件発生している。

また、消防庁が平成 24 年度に実施した石油コンビナート施設や防災設備の被害状況調査（以下「消防庁調査（H24）」という）による、高圧ガス施設の被害状況を表 5.6 及び表 5.7 に示す（この調査では主に震度 5 強以上を観測した事業所を対象としている）。この他の高圧ガス施設、毒劇物タンクにおいては、少数の施設で液状化による地盤、施設の傾きが発生しているが漏洩には至っていない（袖ヶ浦市で天然ガスの漏洩が発生しているが、当該事業所は調査の対象事業所に含まれていない）。

表 5.6 東日本大震災における高圧ガスタンクの被害状況（LNG 以外の可燃性ガス）

震度			5 強以下	6 弱	6 強以上
施設数			410	92	8
被害 施設	タンク本体	漏洩	1 ( $2.4 \times 10^{-3}$ )	—	—
		破損	—	4 ( $4.3 \times 10^{-2}$ )	—
	配管等	漏洩	1 ( $2.4 \times 10^{-3}$ )	—	—
		破損	—	—	—

注 1) 漏洩（本体 1 施設、配管等 1 施設）は、市原市の LPG タンク爆発火災を本体、配管それぞれ各 1 件として計上したものである。

注 2) タンク本体の破損（4 施設）のうち、2 施設は球形タンクのブレース破断、他の 2 施設は液状化によるタンクの傾きとなっている。

表 5.7 東日本大震災における高圧ガス製造設備の被害状況

震度		5 強以下	6 弱	6 強以上
施設数		267	53	7
被害 施設	漏洩	—	2 ( $3.8 \times 10^{-2}$ )	—
	破損	2 ( $7.5 \times 10^{-3}$ )	4 ( $7.5 \times 10^{-2}$ )	—

注 1) 漏洩（2 施設）は栈橋施設の崩落による被害で、液状化によるものか津波によるものかははっきりしていない。

注 2) 震度 5 強の破損（2 施設）は地震動による配管変形である。

注 3) 震度 6 弱の破損（4 施設）は液状化による地盤、施設の傾きである。

## ウ. 工学的解析に基づいた被害モデル

ア、イで示した被害状況は、初期事象の確率推定にあたって多少の参考にはなるにしても、漏洩あるいは漏洩につながる破損の件数は少なく、また震度との関連もほとんど見られないため、これらをもとに対象地区で予想される地震動に対して妥当な確率値を設定することは困難と言える。

これとは別に、危険物タンクの側板座屈に関して、図 5.4 に示すような地震動強さとの関係が工学的解析により得られている（このような地震動強さ被害との関係を「フラジリティ曲線」と呼ぶ）

4)。

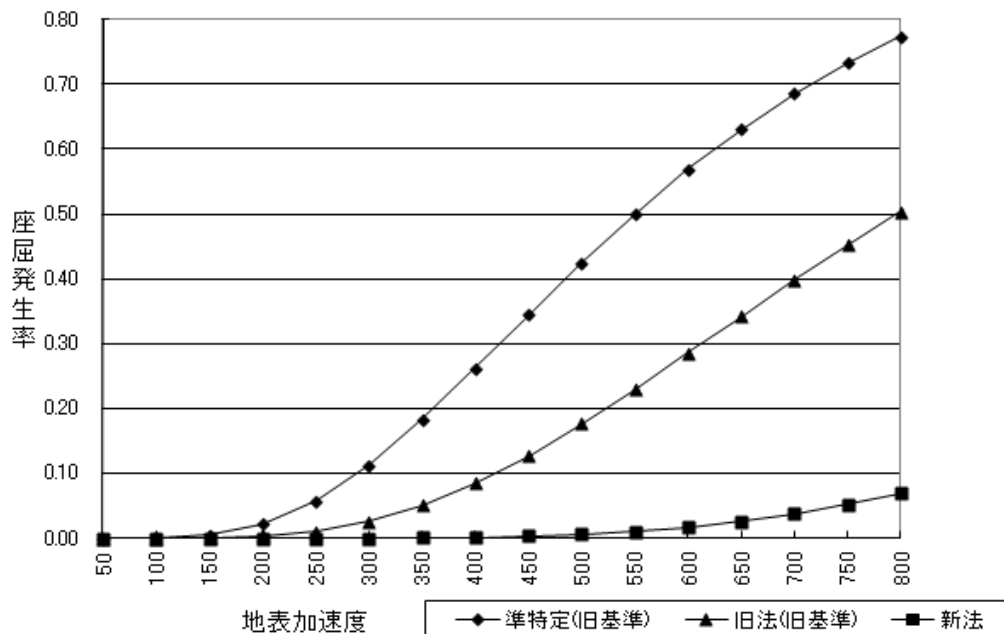


図 5.4 危険物タンクの側板座屈に関するフラジリティ曲線（満液時）

注 1) 容量 1,000kl 以上のタンクを特定タンクといい、500kl 以上 1,000kl 未満のタンクを準特定タンクという。

注 2) 昭和 52 年改正の危険物の規制に関する政令施行後に設置許可申請された特定タンクを新法タンク、それ以前に設置許可申請された特定タンクを旧法タンクという。旧法タンクについては平成 6 年に基準が強化されているが、これに適合するものを旧法(新基準)、適合しないものを旧法(旧基準)と呼ぶ。準特定タンクは平成 11 年に技術基準が制定され、これに適合するものを準特定(新基準)、適合しないものを準特定(旧基準)と呼ぶ。

注 3) このフラジリティ曲線は平成 7 年に実施された石油タンクの調査結果に基づき作成されたものであり、当時旧法タンクの多くが旧基準であり、準特定タンクの技術基準は制定されていなかった。

注 4) 旧法(旧基準)タンクについては平成 25 年 12 月 31 日、準特定(旧基準)タンクについては平成 29 年 3 月 31 日までの新基準への適合期限が設けられている。平成 24 年 12 月現在、容量 1 万 kl 以上のすべての旧法タンクと、1 万 kl 未満の旧法タンクの多くが新基準に適合している。

このフラジリティ曲線により得られる座屈発生確率を表 5.8 に示す。地表加速度は、最大加速度ではなくタンクの損傷に実効的に作用する加速度とされているが、ここでは気象庁の計測震度算出に用いられている次式により、計測震度から逆算して得られる加速度を実効加速度として用いている。

$$I = 2 \cdot \log A + 0.94$$

I : 計測震度

A : 地表加速度 (実効加速度)

初期事象として取り上げた漏洩の発生確率は、表 5.8 の確率値に座屈から漏洩に至る確率を乗じて求めることになるが、この値は例えば次のように設定する。

- 小破漏洩 : 0.1~0.2 (阪神・淡路大震災のときの被害状況に基づく)
- 大破漏洩 : 0.01~0.02 (事例がほとんどないため小破漏洩の 1/10 と仮定)

表 5.8 フラジリティ曲線による危険物タンクの座屈発生確率

震度	計測震度	地表加速度	座屈発生確率		
			新法	旧法・旧基準	準特定・旧基準
5強	5.0	107	1.4E-09	3.0E-05	5.3E-04
	5.1	120	6.3E-09	7.8E-05	1.2E-03
	5.2	135	2.7E-08	1.9E-04	2.5E-03
	5.3	151	1.1E-07	4.5E-04	4.9E-03
	5.4	170	4.3E-07	1.0E-03	9.4E-03
6弱	5.5	191	1.5E-06	2.1E-03	1.7E-02
	5.6	214	5.1E-06	4.3E-03	2.9E-02
	5.7	240	1.6E-05	8.2E-03	4.8E-02
	5.8	269	4.8E-05	1.5E-02	7.6E-02
	5.9	302	1.3E-04	2.6E-02	1.2E-01
6強	6.0	339	3.5E-04	4.4E-02	1.7E-01
	6.1	380	8.7E-04	7.0E-02	2.3E-01
	6.2	427	2.0E-03	1.1E-01	3.1E-01
	6.3	479	4.4E-03	1.5E-01	3.9E-01
	6.4	537	9.0E-03	2.2E-01	4.8E-01

表 5.8 によると、地表加速度が 400gal 程度（計測震度 6.1～6.2、地表加速度 380～427gal）での被害は次のようになる。

○ 準特定・旧基準

- ・ 側板座屈 :  $2 \times 10^{-1} \sim 3 \times 10^{-1}$
- ・ 小破漏洩 :  $2 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$

○ 旧法・旧基準

- ・ 側板座屈 :  $7 \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$
- ・ 小破漏洩 :  $7 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$

これらのフラジリティ曲線に基づいた被害確率は、表 5.1 の阪神・淡路大震災での被害確率よりも数倍ほど大きくなっているが、被災当時は正月明けでタンク貯蔵量が少なかったとされており、安全側の評価としてほぼ妥当な値であると考えられる。

一方、東日本大震災では、側板の座屈は漏洩に至らないものも含めてほとんど発生しておらず、漏洩は地盤沈下に伴う底板損傷によるもの 1 件、そのほかに配管損傷によるもの 1 件だけである（いずれも特定タンク）。底板損傷による漏洩は震度 5 強の区域で発生しており、発生確率は表 5.4 に示したように  $10^{-3}$  程度になる。これに対して、座屈に関するフラジリティ曲線による漏洩確率は、準特定タンク（旧基準）では震度 5 強～6 弱で  $10^{-3}$  程度になるが、特定タンクではこれよりかなり小さく推定されることになる。

このような問題点はあるが、現時点ではこのフラジリティ曲線に基づいて、予想される地震動に応じて危険物タンクの初期事象発生確率を推定することが妥当と考えられる。地震動が比較的小さいところ（概ね震度 5 強～震度 6 弱の前半）では過小評価になる可能性もあるが、このあたりの地震動では漏洩が発生したとしてもほとんどが小さな破口からの微量漏洩にとどまるであろう。配管からの漏洩については、阪神・淡路大震災の時の被害状況から、地盤の液状化危険に応じて、本体小破の 2 倍～数倍の値を設定すればよいと考えられる。

なお、旧法・新基準及び準特定・新基準のタンクについては、該当するフラジリティ曲線が得られておらず、専門的判断に委ねることになる。また、新法タンクにおいても、配管破損による漏洩発生確率（特に小破漏洩）に関しては旧法・旧基準タンクと同程度とすべきである。

注) 図 5.4 のフラジリティ曲線は、累積対数正規分布と呼ばれ、平均 ( $\mu$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ ) の 2 つのパラメータにより決まる曲線である。これらのパラメータは次の値をとる。

- 準特定・旧基準 :  $\mu = 6.31$ 、 $\sigma = 0.5$
- 旧法・旧基準 :  $\mu = 6.68$ 、 $\sigma = 0.5$
- 新法 :  $\mu = 7.35$ 、 $\sigma = 0.45$

ある地表加速度 A における座屈発生確率は、エクセル関数 LOGNORMDIST (A,  $\mu$ ,  $\sigma$ ) により計算することができる。

## (2) 事象の分岐確率

事象の分岐確率は、想定される地震動の強さとそれぞれの分岐の特性を考慮しながら推定する。

ここでは ET に現れる以下の分岐について、確率を推定するときの考え方を述べる。

- 機械的な防災設備の成否
- 物理的な防災設備の成否
- 人為的な防災活動の成否
- 現象の発生の有無

## ア. 機械的な防災設備の成否

緊急遮断弁、移送設備、散水・水幕設備、消火設備、除害設備などの機械的な防災設備（防災システム）が地震時に作動しなくなる主な原因としては次のものが考えられる。

- 設備の電源喪失
- 地震による設備の損傷（特に空気、水、消火剤などを送る配管系）
- 設備の偶発的な故障

これを簡略化した FT 図として表わすと図 5.5 に示すようになる。「設備の電源喪失」は、「常用電源の停止」と「非常用電源の故障」が重なったときに起こりうる。震度 6 強以上の強い地震動が想定される場合には、「常用電源の停止」の可能性が極めて大きくなり、非常用電源が付いていない場合には、頂上事象の「防災設備の不作動」の確率はこの確率に支配される。

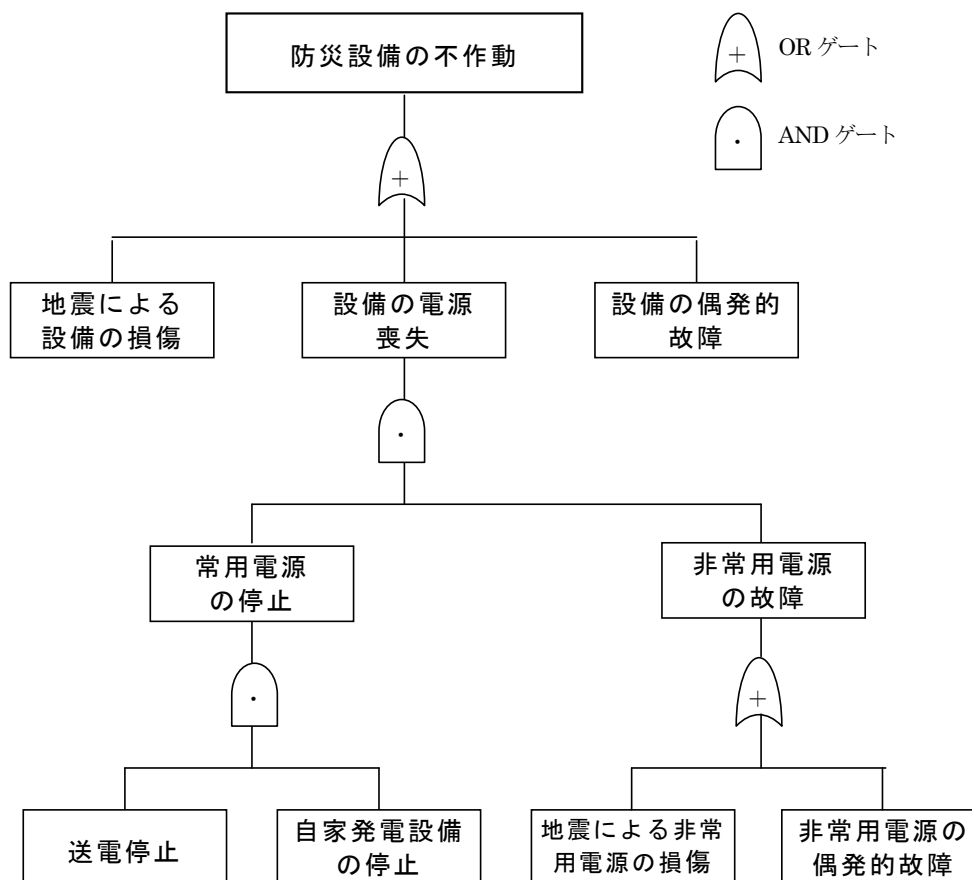


図 5.5 地震時における防災設備不作動に関する FT 図

非常用電源（ディーゼル発電機やバッテリー）が付いている場合には、「常用電源の停止」とあわせて、「地震による非常用電源の損傷」及び「非常用電源の偶発的故障」の確率を考慮して「設備の電源喪失」の確率を推定し、さらに「地震による設備の損傷」及び「設備の偶発的故障」の確率とあわせて、頂上事象の「設備の不作動」の確率を推定することになる。

「設備の偶発的故障」は平常時にたまたま起こりうる故障と地震発生が重なった場合で、その確率は平常時の不作動確率と等しくなる。その他の末端事象は概ね以下のように推定する。

## ① 地震による設備の損傷

### a. 緊急遮断弁・タンク元弁

危険物タンク及び高圧ガスタンクに設置された緊急遮断弁及びタンク元弁の損傷の状況を表 5.9 に示す（地震後のメンテナンスにより確認されたもので電源喪失による不作動は除く。以下同様）。これによると、作動不能であったものは空気弁の 4 件のみで（空気の放出ができなくなり弁が閉止不能となったもの）、その他の弁はすべて正常であったようである。なお、弁の不作動が震度 5 強以下の区域のみで発生している原因はわからないが、この区域にあった設備数が多いことにも依存していると思われる。これらのことから、地震により弁が直接損傷する確率は相当に小さく、空気弁に関しては  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  程度、電動弁に関しては同程度かそれ以下の確率値を設定してよいと考えられる。

表 5.9 東日本大震災における緊急遮断弁・タンク元弁の被害状況  
(危険物タンク・高圧ガスタンク)

		5 強以下	6 弱	6 強以上
電動弁	点検数	2178	295	713
	作動不能数	—	—	—
空気弁	点検数	1900	560	56
	作動不能数	4 ( $2.1 \times 10^{-3}$ )	—	—
電動・ 空気弁	点検数	459	23	1
	作動不能数	—	—	—
手動弁	点検数	6317	937	129
	作動不能数	—	—	—

注) 手動弁は図 5.5 の F T 図には表れないが参考として示している。

### b. その他の設備

被災タンクの内容物を移送するための電動ポンプ、冷却やガス拡散防止のための散水・水幕設備、塩素タンクなどに設置された吸収塔方式の除害設備、危険物タンクの固定泡消火設備の損傷の状況を表 5.10 に示す。

電動ポンプは、震度 5 強以下の区域で 6 件、6 強以上の区域で 11 件の不作動が挙げられている



が、これらの被害は液状化によるものか津波によるものかはっきりしない。これらを含めても被害率は  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  程度になっている。

除害設備（吸収塔方式）の作動不能数は、震度 6 弱での 1 件だけであるが、設備数が少なく被害率は  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  程度と電動ポンプよりも 1 桁ほど大きくなる。

散水・水幕設備と消火設備は、点検施設が多い割に不作動件数は 0 となっている。しかしながら、これらの設備は水・消火薬剤タンク、電動ポンプ、放水・放出口、及びこれらを繋ぐ配管系から構成されるシステムであり、電動ポンプの被害率が  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  程度であること、配管系は液状化の被害を受けやすいことなどを考慮すると  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  程度の値を設定することが妥当と考えられる。

表 5.10 東日本大震災におけるその他の防災設備の被害状況

		5 強以下	6 弱	6 強以上
電動ポンプ	点検数	6620	586	1993
	作動不能数	6 ( $9.1 \times 10^{-4}$ )	—	11 ( $5.5 \times 10^{-3}$ )
散水・水幕設備	点検数	2280	222	86
	作動不能数	—	—	—
除害設備 (吸収塔方式)	点検数	83	18	1
	作動不能数	—	1 ( $5.6 \times 10^{-2}$ )	—
消火設備	点検数	2412	304	94
	作動不能数	—	—	—

## ② 送電停止

電力会社からの送電の状況（事業所単位）を表 5.11 に示す。これによると、送電が停止する確率は、震度 5 強以下で 1/3 程度、6 弱で 2/3 程度、6 強以上では 100% となっており、概ねこの程度の確率値を設定してよいと考えられる。

表 5.11 東日本大震災における停電発生状況

	5 強以下	6 弱	6 強以上
事業所数	62	24	9
停電した事業所数	21 ( $3.4 \times 10^{-1}$ )	16 ( $6.7 \times 10^{-1}$ )	9 (1.0)

## ③ 自家発電設備の停止

事業所の自家発電設備の停止状況を表 5.12 に示す。これによると、自家発電設備が停止する確率は、震度 5 強以下で 1/4 程度、6 弱で 1/2 程度、6 強以上では該当事業所数は少ないが 100% となっており、概ねこの程度の確率値を設定してよいと考えられる。

表 5.12 東日本大震災における自家発電設備の停止状況

	5 強以下	6 弱	6 強以上
事業所数	32	11	2
停電した事業所数	8 ( $2.5 \times 10^{-1}$ )	6 ( $5.5 \times 10^{-1}$ )	2 (1.0)

#### ④ 非常用電源の損傷

常用電源が喪失したときの非常用電源としては、バッテリーとディーゼル発電機がある。バッテリーは、地震による損傷はほとんどないと考えられるが、これでカバーできるのは計装システムや緊急遮断弁（空気弁）など一部の設備に限られる。ディーゼル発電機の被害状況は表 5.13 に示すとおりである。作動不能数は震度 6 弱のところの 1 件だけで信頼性には乏しいが、地震動に応じて  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  程度の値を設定してよいと考えられる。

表 5.13 東日本大震災におけるディーゼル発電機の被害状況

	5 強以下	6 弱	6 強以上
点検数	95	31	1
作動不能数	—	1 ( $3.2 \times 10^{-2}$ )	—

#### イ. 物理的な防災設備の成否

壁や囲いのような防災設備で、ET 図に現れるものとして危険物タンクの防油堤や仕切堤などがある。防油堤に関して、消防庁調査（H23）による被害状況を表 5.14 に示す。ここで、施設数は各震度区分に該当する危険物タンクの総数、被害数は防油堤に被害があった危険物タンク数である。これから、地震動に応じて、準特定・特定タンクの防油堤は  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  程度、特定タンクの防油堤は  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  程度の値を設定してよいと考えられる。ただし、表 5.14 の被害には軽微なものも含まれ、損傷によって必ずしも大量の油が堤外に流出するとは限らない。

表 5.14 東日本大震災における防油堤の被害状況

震度		5 強以下	6 弱	6 強以上
準特定・特定外タンク	施設数	1437	519	90
	被害数	15 ( $1.0 \times 10^{-2}$ )	28 ( $5.4 \times 10^{-2}$ )	15 ( $1.7 \times 10^{-1}$ )
特定タンク	施設数	779	221	129
	被害数	1 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )	12 ( $2.3 \times 10^{-2}$ )	5 ( $3.9 \times 10^{-2}$ )

#### ウ. 人為的な防災活動の成否

漏洩や火災が発生した施設に駆けつけてバルブ閉止や消火活動などの防災活動を行うときの成否は、地震動の強さや液状化の程度に大きく依存する。震度 5 強程度の地震で液状化の被害も小さい

ときには、平常時とほぼ同程度の活動が期待できるであろう。しかし、震度6弱以上の強い地震動を受け、しかも構内道路や施設周辺の液状化がひどい場合には、現場に駆けつけることさえ困難になることも予想される。このようなことを考慮して、活動の種類に応じた妥当な分岐確率を設定する。

### (3) 災害事象の発生確率

平常時と同様に、ET に初期事象の発生確率と事象の分岐確率を与えることにより、各災害事象の発生確率を推定する。危険物タンクのET（第4章のET図1-1～1-4）に基づいた災害発生確率の推定例を以下に示す。なお、ここで示す係数や確率値はあくまで例であり、アセスメント実施時には対象施設や防災設備の特性、地盤条件などを考慮して妥当な値を設定する必要がある。

#### a. 初期事象の発生確率

震度6強（計測震度6.2）として、 fragility 曲線（表5.8）に基づいて初期事象の発生確率を推定すると次のようになる。ただし、座屈から漏洩に至る確率を0.1、配管からの漏洩確率は本体の小破漏洩の5倍（液状化危険大）、大破漏洩の確率は小破漏洩の1/10と仮定した。

##### ○ 準特定・旧基準タンク

- ・ 配管の小破漏洩 :  $1.6 \times 10^{-1}$
- ・ 本体の小破漏洩 :  $3.1 \times 10^{-2}$
- ・ 配管の大破漏洩 :  $1.6 \times 10^{-2}$
- ・ 本体の大破漏洩 :  $3.1 \times 10^{-3}$

##### ○ 旧法・旧基準タンク

- ・ 配管の小破漏洩 :  $5.5 \times 10^{-2}$
- ・ 本体の小破漏洩 :  $1.1 \times 10^{-2}$
- ・ 配管の大破漏洩 :  $5.5 \times 10^{-3}$
- ・ 本体の大破漏洩 :  $1.1 \times 10^{-3}$

##### ○ 新法タンク

- ・ 配管の小破漏洩 :  $5.5 \times 10^{-2}$ （旧法・旧基準と同程度とする）
- ・ 本体の小破漏洩 :  $2.0 \times 10^{-4}$
- ・ 配管の大破漏洩 :  $1.0 \times 10^{-4}$
- ・ 本体の大破漏洩 :  $2.0 \times 10^{-5}$

#### b. 事象の分岐確率

事象分岐確率は次のように設定（仮定）する。

- ・ 緊急遮断の失敗 : 1.0（電動弁で送電、自家発ともに停止。非常用電源なし）
- ・ バルブ手動閉止の失敗 : 0.1
- ・ 一時的な流出拡大防止の失敗 : 0.1
- ・ 緊急移送の失敗 : 1.0（電動ポンプで送電、自家発ともに停止。非常用電源なし）

- ・ 仕切堤による流出拡大防止の失敗 : 0.1 (準特定タンクは仕切堤がなく 1.0 とする)
- ・ 防油堤による流出拡大防止の失敗 :  $10^{-2}$  (堤外に大量に流出するケースとして)
- ・ 着火 : 0.1 (第 1 石油類)

### c. 災害事象の発生確率

E T図に上記の確率を与えて災害事象の発生確率を求める。旧法・旧基準タンクについて例を示すと次のようになる。

- ・ 配管の小破漏洩 : E T図 2-1
- ・ 本体の小破漏洩 : E T図 2-2
- ・ 配管の大破漏洩 : E T図 2-3
- ・ 本体の大破漏洩 : E T図 2-4

ここで、一連のE T図の中に同じ災害事象(例えば防油堤内流出火災)が複数現れる場合には、それぞれの発生確率を足し合わせることになる。準特定タンク、新法タンクについても、同様に災害発生確率を求めると、表 5.15 に示すような結果が得られる。なお、同表では、災害発生危険度を仮数部小数点 1 桁まで表しているが、このような精度はなく最終的にはオーダー(例えば  $5 \times 10^{-4}$  から  $5 \times 10^{-3}$  の範囲であれば  $10^{-3}$  程度)で捉えるべきである。

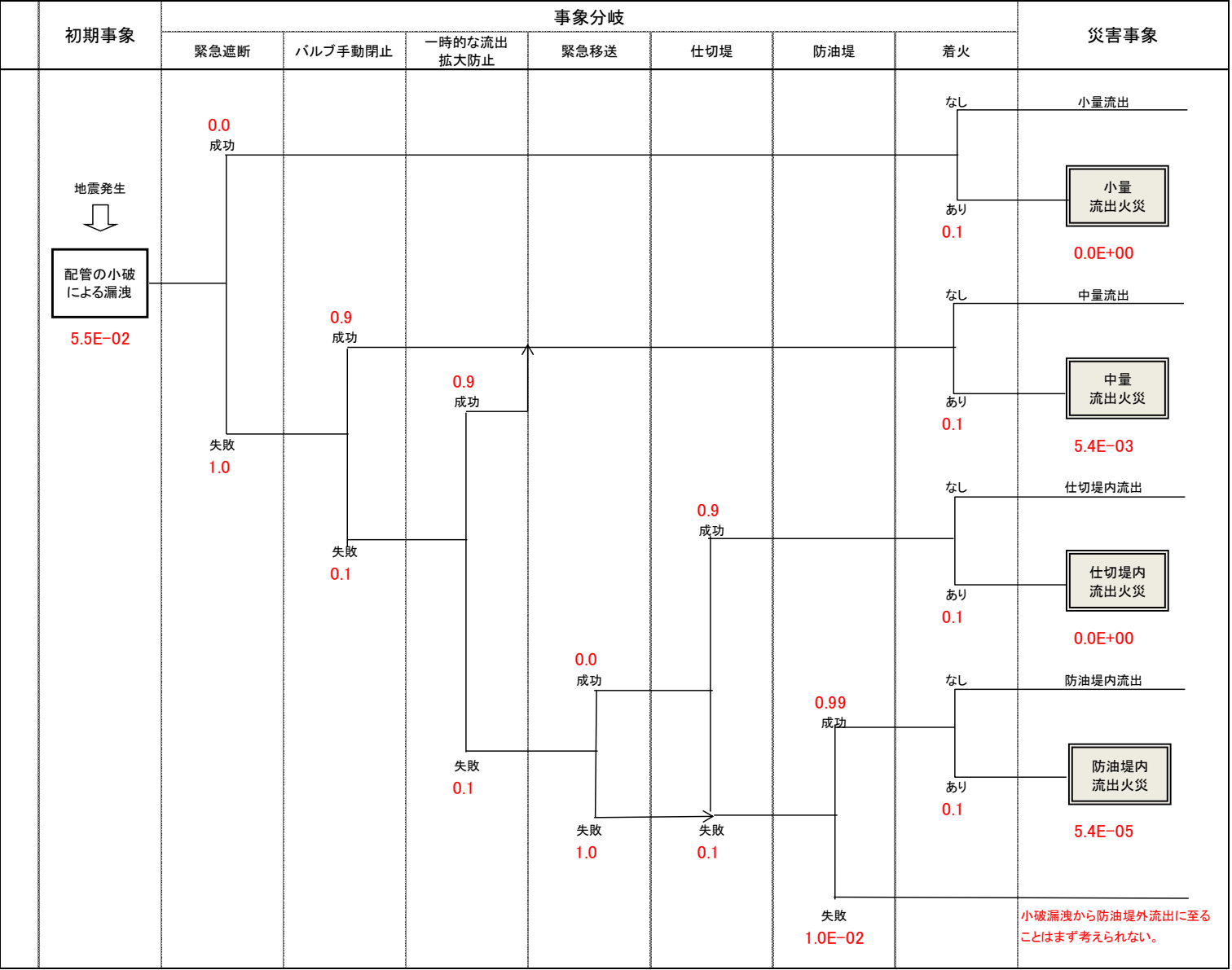
表 5.15 危険物タンクの災害発生危険度の推定例

災害事象	準特定・旧基準	旧法・旧基準	新法
小量流出火災	—	—	—
中量流出火災	$1.9 \times 10^{-2}$	$6.4 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-3}$
仕切堤内流出火災	—	—	—
防油堤内流出火災	$2.4 \times 10^{-3}$	$8.1 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-5}$
防油堤外流出火災	$1.9 \times 10^{-5}$	$6.6 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-7}$

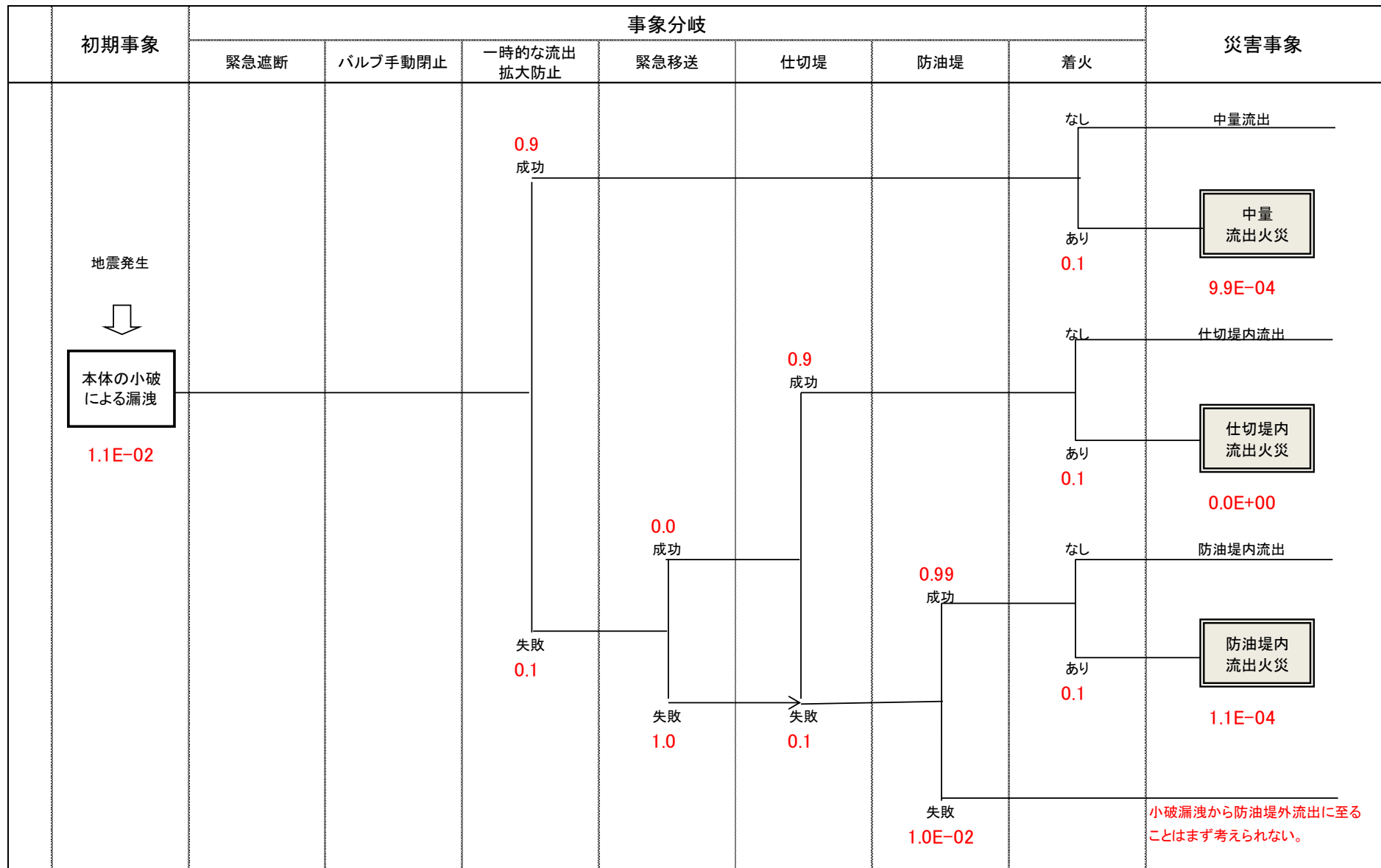
なお、フラジリティ曲線が得られていないタンクを評価対象とする場合には、例えば旧法・新基準は新法と同程度、準特定・新基準は旧法・旧基準と同程度といったような仮定のもとで初期事象の発生確率を設定するしかない。

また、危険物の製造所や移送取扱所、高压ガスのタンクや製造設備についてもフラジリティ曲線はなく、現段階では各施設の耐震強度や過去の地震での被害状況を参考に、危険物タンクのフラジリティ曲線の中で近いと考えられるものを適用して初期事象の確率推定を行うことになる。

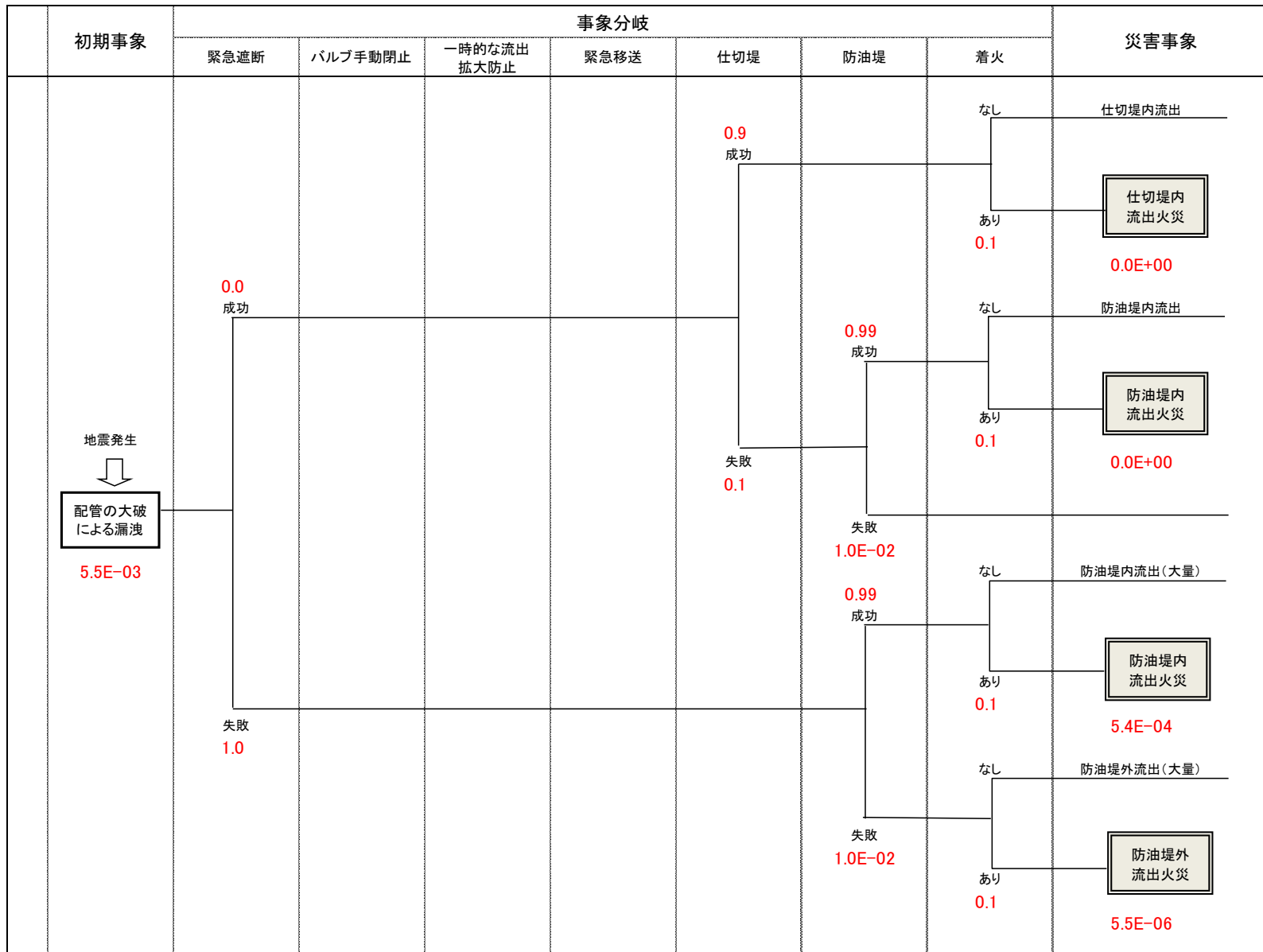
ET図2-1 配管の小破による漏洩(旧法・旧基準タンク)



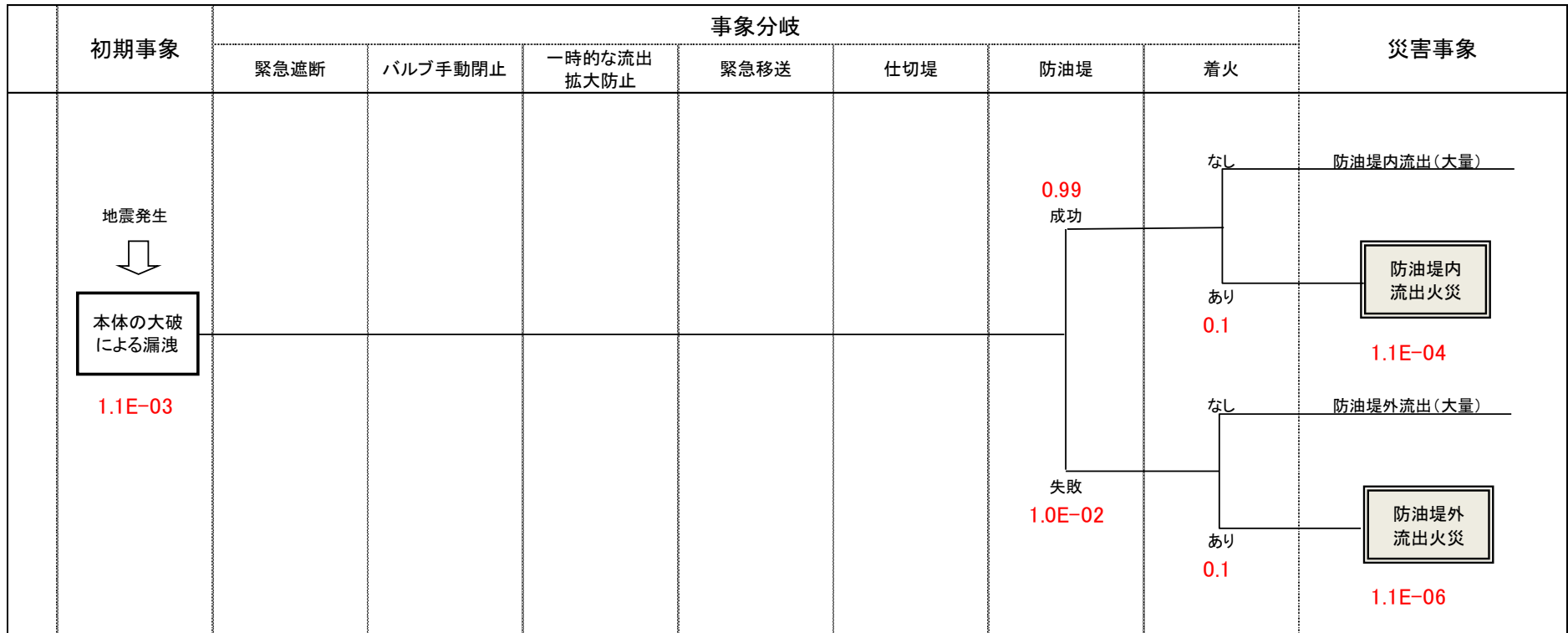
ET図2-2 タンク本体の小破による漏洩(旧法・旧基準タンク)



ET図2-3 配管の大破による漏洩(旧法・旧基準タンク)



ET図2-4 タンク本体の大破による漏洩(旧法・旧基準タンク)





## 5.2 災害の影響度の推定

ET で抽出された各災害事象の影響度を推定する。その手順は以下のとおりであり、平常時の事故、短周期地震動による被害で共通である。

- ① 解析モデルの選定
- ② 基準値の設定
- ③ 影響度の推定

### 5.2.1 解析モデルの選定

可燃性物質や毒性物質を取り扱う施設で漏洩などの事故が発生した場合、液面火災、ガス爆発（蒸気雲爆発）、フラッシュ火災、毒性ガス拡散など種々の災害現象により周囲に影響を与える可能性がある。フラッシュ火災とは、可燃性蒸気雲の燃焼で火炎伝播速度が比較的遅く過圧が無視できる現象をいう。災害拡大過程における各事象では、これらの災害現象が規模や継続時間の違いとなって現れる。このような災害現象を解析するためのモデルが国内外で数多く提案されており、そのなかから適切なものを選定して適用する。

解析モデルには、現象の単純化の程度によって簡易なモデルから詳細なモデルまで様々なものがある。できれば詳細なモデルを適用することが望ましいが、そのためには専用のソフトウェアを購入したり、多くのプロセスデータや物性データを準備する必要がある。本防災アセスメントは石油コンビナート全域を対象としたマクロな評価であり、全体的な精度のバランスを考慮すると、災害現象に適合するものであれば簡易モデルでも問題はない。

石油コンビナートの主要な施設について、起こり得る主な災害現象と適用モデルの種類を一般的にまとめたものが表 5.16 である。具体的なモデルの一例（簡易モデル）を「参考資料 2 災害現象解析モデルの一例」に示す。ただし、液体の流出範囲や爆発や破裂に伴う飛散物の影響など現象によっては算定が困難なものもある。

表 5.16 石油コンビナートにおける主要な施設の災害現象と適用モデルの種類

施設種類	考えられる災害の形態	主な適用モデルの種類
危険物 タンク	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→液面火災</li> <li>○ タンク火災（液面火災）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出（流出火災）</li> <li>○ 火災面積（流出火災）</li> <li>○ 放射熱（液面火災）</li> </ul>
可燃性 ガス タンク	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→液面火災 蒸発→蒸気雲形成→爆発 ファイバーボール フラッシュ火災</li> <li>○ 気体流出→噴出火災 蒸気雲形成→爆発 フラッシュ火災</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出・気体流出</li> <li>○ 蒸発（過熱液体）</li> <li>○ ガス拡散</li> <li>○ 爆風圧（爆発）</li> <li>○ 放射熱（ファイバーボール）</li> </ul>
毒 性 ガス タンク	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→蒸発→拡散（毒性）</li> <li>○ 気体流出→拡散（毒性）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出・気体流出</li> <li>○ 蒸発（過熱液体）</li> <li>○ ガス拡散</li> </ul>
毒 性 液 体 タンク	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→蒸発→拡散（毒性）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出</li> <li>○ 蒸発（揮発性液体）</li> <li>○ ガス拡散</li> </ul>
プラント	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→液面火災 蒸発→蒸気雲形成→爆発 ファイバーボール フラッシュ火災 蒸発→拡散（毒性）</li> <li>○ 気体流出→噴出火災 拡散→蒸気雲形成→爆発 フラッシュ火災 拡散（毒性）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出・気体流出</li> <li>○ 蒸発（過熱液体）</li> <li>○ 火災面積（流出火災）</li> <li>○ ガス拡散</li> <li>○ 爆風圧（爆発）</li> <li>○ 放射熱（液面火災）</li> <li>○ 放射熱（ファイバーボール）</li> </ul>
タンカー 棧 橋	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→液面火災 蒸発→蒸気雲形成→爆発 フラッシュ火災 蒸発→拡散（毒性）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出</li> <li>○ 蒸発（過熱液体）</li> <li>○ 火災面積（流出火災）</li> <li>○ ガス拡散</li> <li>○ 爆風圧（爆発）</li> <li>○ 放射熱（液面火災）</li> </ul>
パイプ ライン	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出→液面火災 蒸発→蒸気雲形成→爆発 フラッシュ火災 蒸発→拡散（毒性）</li> <li>○ 気体流出→噴出火災 拡散→蒸気雲形成→爆発 フラッシュ火災 拡散（毒性）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 液体流出・気体流出</li> <li>○ 蒸発（過熱液体）</li> <li>○ 火災面積（流出火災）</li> <li>○ ガス拡散</li> <li>○ 爆風圧（爆発）</li> <li>○ 放射熱（液面火災）</li> </ul>

### 5.2.2 基準値の設定

物理的作用の解析モデルは、一般に発災地点からの距離と放射熱、爆風圧、ガス拡散濃度などの作用強度との関係を表わしたものである。したがって、作用強度に対してある基準値を設定し、強度がこの値を超える距離を求めて影響範囲とすることになる。基準値は、作用強度とそれを受ける対象物の被害程度をもとに設定するが、両者の関係は文献によってかなりのばらつきがある。本防災アセスメントにおいては、影響を受ける対象は主に石油コンビナート区域外の一般住民であり、基準値設定の目安は概ね以下になる。

#### (1) 放射熱の影響

放射熱の影響についてはこれまで様々な文献で論じられており、それをまとめたものが表 5.17 である。液面火災のように長時間継続する可能性がある火災に対しては、人体が単位時間に受ける放射熱の基準値としては、現指針（平成 13 年）において示されている  $2.3\text{kW/m}^2$  ( $2,000\text{kcal/m}^2\text{h}$ ) 程度の値が用いられることが多い。地震時の市街地大火に対する避難計画では  $2.4\text{kW/m}^2$  ( $2,050\text{kcal/m}^2\text{h}$ ) という値が用いられた例があり、実験によりこの値がほぼ妥当であることが確かめられている<sup>5)</sup>。この値は、概ね数 10 秒間受けることにより痛みを感じる程度の熱量である。

放射熱による被害の程度は、人体が単位時間に受ける熱量と曝露時間によって決まる。消防庁の旧指針（平成 6 年）<sup>6)</sup> には、火傷や発火を起こす放射強度  $E$  ( $\text{W/m}^2$ ) と曝露時間  $T$  (s) との関係として次式が示されている。

$$E=A \times T^n \quad (\text{式 5.5})$$

ここで、 $A$ 、 $n$  は影響の内容・程度によって決まる係数であり、表 5.18 に示すような値をとる。これによると、人体の火傷及び痛みを引き起こす曝露時間と放射強度は表 5.19 のようになり、現指針（平成 13 年）に示されているファイヤーボールの基準値 ( $11.6\text{kW/m}^2$ ) は約 10 秒で火傷を起こす強度となる。

一方、1950～1960 年代米国における Stoll らの実験により、人体皮膚に 2 度の熱傷（熱により表皮がはがれて水ぶくれを生じる）をもたらす熱量及び曝露時間が示されている<sup>7)</sup>。これはストール曲線と呼ばれ、現在でも米国では防護服の熱の防護性能の基準として用いられ、日本においても JIS8024:2009「熱及び火炎に対する防護服一火炎及び放射熱曝露時の熱伝達性測定方法」において採用されている。

図 5.6 は、旧指針（平成 6 年）の式によって示される火傷及び痛みを引き起こす放射強度（表 5.19 の関係）と、ストール曲線とをあわせて示したものである。このように、表 5.19 の火傷に対する関係とストール曲線は、概ね 5 秒以上の曝露時間に対してかなり近いものになっている。

表 5.17 放射熱の影響

放射熱強度		状況および説明	出典
(kW/m <sup>2</sup> )	(kcal/m <sup>2</sup> h)		
0.9	800	太陽（真夏）放射熱強度	*1)
1.3	1,080	人が長時間暴露されても安全な強度	*2)
1.6	1,400	長時間さらされても苦痛を感じない強度	*5)
2.3	2,000	露出人体に対する危険範囲（接近可能） 1 分間以内で痛みを感じる強度 <b>現指針（平成 13 年）に示されている液面火災の基準値</b>	*3)
2.4	2,050	地震時の市街地大火に対する避難計画で用いられる許容限界	*4)
4.0	3,400	20 秒で痛みを感じる強度。皮膚に水疱を生じる場合があるが、致死率 0%	*5)
4.6	4,000	10～20 秒で苦痛を感じる強度 古い木板が長時間受熱すると引火する強度 フレアスタック直下での熱量規制（高压ガス保安法他）	*2)
8.1	7,000	10～20 秒で火傷となる強度	*2)
9.5	8,200	8 秒で痛みの限界に達し、20 秒で第 2 度の火傷（赤く斑点ができ水疱が生じる）を負う	*5)
11.6	10,000	<b>現指針（平成 13 年）に示されているファイヤーボールの基準値（ファイヤーボールの継続時間は概ね数秒以下と考えられることによる）</b>	*3)
11.6～	10,000～	約 15 分間に木材繊維などが発火する強度	*2)
12.5	10,800	木片が引火する、あるいはプラスチックチューブが溶ける最小エネルギー	*5)
25.0	21,500	長時間暴露により木片が自然発火する最小エネルギー	*5)
37.5	32,300	プロセス機器に被害を与えるのに十分な強度	*5)

\*1) 理科年表

\*2) 高压ガス保安協会：コンビナート保安・防災技術指針（1974）

\*3) 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（2001）

\*4) 長谷見雄二, 重川希志依: 火災時における人間の耐放射限界について, 日本火災学会論文集, Vol.31, No.1(1981)

\*5) Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques, ed.P.J.Kayes. Washington, DC: Office of Environmental and Scientific Affairs, World Bank. (1985)

表 5.18 式 5.4 における係数（A、n）の値<sup>8)</sup>

条件	A	n
火傷 <sup>*1</sup>	$6.0 \times 10^4$	-0.725
痛み <sup>*1</sup>	$2.0 \times 10^4$	-0.562
樫の発火 <sup>*1</sup>	$43.0 \times 10^4$	-0.482
杉の発火 <sup>*1</sup>	$29.1 \times 10^4$	-0.434
繊維板の発火 <sup>*1</sup>	$14.2 \times 10^4$	-0.323
樫、杉及びマホガニーの引火 <sup>*2</sup>	$12.8 \times 10^4$	-0.398
ハードボード（厚さ 4.8mm）の引火 <sup>*2</sup>	$22.0 \times 10^4$	-0.422
インシュレーションボード（厚さ 12.0mm）の引火 <sup>*2</sup>	$10.4 \times 10^4$	-0.428
パーティクルボード（厚さ 12.0mm）の引火 <sup>*2</sup>	$21.4 \times 10^4$	-0.447
メタアクリル樹脂板（厚さ 3.8mm）の引火 <sup>*2</sup>	$27.7 \times 10^4$	-0.512
ナイロンカーペット（厚さ 7.0mm）の引火 <sup>*2</sup>	$38.5 \times 10^4$	-0.579

\*1) 石油コンビナートの防災アセスメント策定指針（平成 6 年度）より引用した値。

\*2) ISO の基準に基づき試験表面に規定の放射熱を与えながら、一定のサイクルでガス炎の口火を近づけて、試料から放出される可燃性分解ガスに着火させる試験の結果から算出した値。

表 5.19 人体への影響に関する放射強度と暴露時間の関係（火傷・痛み）

暴露時間 (s)	放射強度・火傷 (kW/m <sup>2</sup> )	放射強度・痛み (kW/m <sup>2</sup> )
5	18.7	8.1
10	11.3	5.5
15	8.4	4.4
20	6.8	3.7
25	5.8	3.3
30	5.1	3.0
35	4.6	2.7
40	4.1	2.5
45	3.8	2.4
50	3.5	2.2
55	3.3	2.1
60	3.1	2.0
65	2.9	1.9
70	2.8	1.8
75	2.6	1.8
80	2.5	1.7
85	2.4	1.6
90	2.3	1.6
95	2.2	1.5
100	2.1	1.5

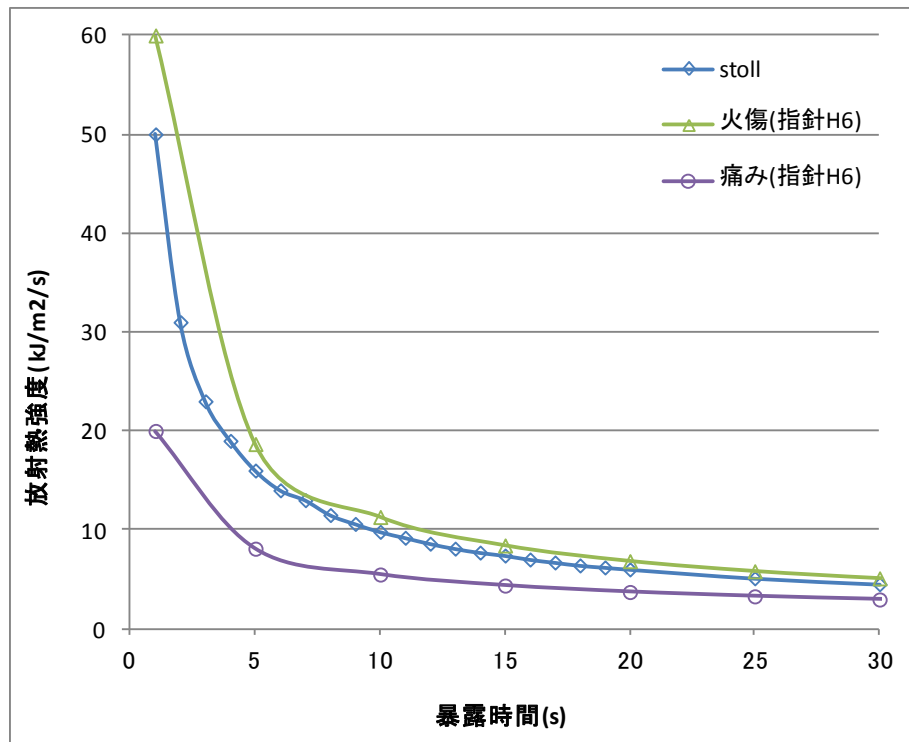


図 5.6 人体に対する放射熱の影響

以上のことから、放射熱に対する基準値については次のようなことがいえる。

- 液面火災の放射熱に対しては  $2.3\text{kW/m}^2$  程度の値が妥当といえる。
- ファイヤーボールの放射熱に対しては、東日本大震災における LPG 爆発火災で見られたように 20 秒以上継続するようなケースも考えられ、想定されるファイヤーボールの継続時間を考慮して、表 5.19 あるいは図 5.6 などを目安に妥当な値を設定する。

## (2) 爆風圧の影響

高圧ガス保安法・コンビナート等保安規則においては、既存製造施設に対する限界値を  $11.8\text{ kPa}$  ( $0.12\text{kgf/cm}^2$ )、新規製造施設に対する限界値を  $9.8\text{ kPa}$  ( $0.1\text{kgf/cm}^2$ ) として、保安物件から必要な距離を確保することとしており、現指針（平成 13 年）でもこの値を採用していた。この値は、表 5.20 において人体に対する被害の限界値とされる  $12.3\text{kPa}$  ( $0.125\text{kgf/cm}^2$ ) に近い値となっている。蒸気雲爆発に伴う爆風圧の影響については、その他にも表 5.21～5.23 に示すようなものがあるが、文献によってかなりの開きがある。

表 5.20 爆風圧と被害との関係<sup>9)</sup>

爆風圧		被害	
Pa	kgf/cm <sup>2</sup>	対象	被害程度
3900	0.04	窓ガラス	壊れることあり
39200	0.4		おおむね破損
24500	0.25	木造建物	小破
58800	0.6		半壊
147100	1.5		倒壊
58800	0.6	鉄骨塔	倒壊
58800	0.6	LPG タンク	小破
255000	2.6		破壊
22600	0.23	石油タンク	小破
36300	0.37		大破
12300	0.125	人間	人間に被害を及ぼさない限界
20600	0.21		鼓膜破れることあり
41200	0.42		肺破れることあり
411900	4.2		死亡(50%)

表 5.21 木造建築物に対する爆風圧の影響<sup>10)</sup>

爆風圧		影響内容
Pa	kgf/m <sup>2</sup>	
7800～9800	800～1000	窓ガラスが破損する
14700～19600	1500～2000	窓枠や雨戸が折損する
58800～68600	6000～7000	小屋組みが緩み、柱が折れる

表 5.22 人体に対する爆風圧の影響<sup>11)</sup>

爆風圧		影響内容
Pa	kgf/m <sup>2</sup>	
19600	2000	1%の人の鼓膜が破損する
34300	3500	5%の人の鼓膜が破損する
49000	5000	10%の人の鼓膜が破損する
98100	10000	50%の人の鼓膜が破損する
205900	21000	85%の人の鼓膜が破損する

今回、東日本大震災での LPG 爆発火災など最近の爆発事例について、算定上の爆風圧と実際の被害状況を比較した結果、評価手法の妥当性や爆発ガス量推定の不確実性などの問題はあるが、爆発発生個所からある程度離れたところでは、表 5.23 の Clancey (1972) による関係が比較的よく適合していることが確認された（ただし爆発発生個所の直近は不明である）。

表 5.23 から基準値設定に関する主な項目を抽出すると概ね次のようになっている。

- 14kPa：家の壁や屋根が一部破壊される
- 7kPa：住めなくなる程度に家屋の一部が破壊される
- 5kPa：家屋が多少の被害を被る
- 2.8kPa：建物の小さな被害の限界
- 2.1kPa：安全限界（この値以下では 95%の確率で大きな被害はない）

一般に、爆風圧に対しては、人体よりも建屋等の構造物のほうが脆弱と考えられている。東日本大震災の LPG 爆発では、計算上は現指針（平成 13 年）の基準値（11.8kPa）を下回る範囲でも、建屋の窓ガラスやスレート屋根が破損するなどの被害が少なからず発生しており、これにより二次的に人が負傷する可能性も否定できない。したがって、特に爆発が想定される施設の周辺に多くの一般家屋が存在するような場合には、爆風圧の基準値としてこれまでの値よりも小さい 2～5 kPa 程度の値を設定することが妥当と考えられる。



表 5.23 爆風圧による被害<sup>12)</sup>

圧力 [kPa]	被害
0.14	周波数が低い（10~15Hz）場合は、不快な騒音（137dB）となる
0.21	歪みのある大きなガラス窓が破壊される
0.28	大きな騒音（143dB）、ガラスが壊れる音波
0.7	歪みのある小さな窓が破壊される
1	ガラスが破壊される一般的な圧力
2.1	「安全限界」（この値以下では 0.95 の確率で大きな被害はない）「推進限界」（物が飛ばされる限界）家の天井の一部が破損：窓ガラスの 10%が破壊される
2.8	建物の小さな被害の限界
3.5~7	大・小の窓ガラスが普通破壊される：窓枠もときには破壊される
5	家屋が多少の被害を被る
7	住めなくなる程度に家屋の一部が破壊される
7~14	アスベスト波板が破壊される 鉄またはアルミ製波板は曲がってすぐ壊れる（家庭用の）木板は破損して吹き飛ばされる
9	建物のスチール製フレームが多少曲げられる
14	家の壁や屋根が一部破壊される
14~21	未強化コンクリートやブロッ壁が破壊される
16	建物の大きな被害の限界
17	レンガ造家屋の 50%が破壊される
21	工場内の重機械（3000lb）は被害なし スチール製フレームでできた建物が破壊され、基礎から外れる
21~28	無筋建物、鋼板建物が破壊される 油貯槽が破裂する
28	軽量建築物が破壊される
35	木製の用役用棒（電柱など）が切断される 建物内の背の高い水圧機(40000lb) が軽い被害を被る
35~50	家屋が全壊される
50	貨車が転覆させられる
50~55	強化していない厚さ 8~12in のブロックが剪断や撓みにより破損される
63	貨車が全壊する
70	ほとんどの建物が崩壊する 重量機械(7000lb) が移動し破壊される 極重量機械(12000lb) は残存する
2070	クレータの縁ができる限界

### (3) 可燃性ガス拡散（フラッシュ火災）の影響

フラッシュ火災については、放射熱の影響を算定するためのモデルがほとんど開発されていないため、拡散したガスが引火・燃焼（爆発）する範囲で影響の評価を行う。可燃性混合気中を火炎が伝播し得る可燃性ガス濃度の限界を爆発限界という。可燃性ガスの希薄側の限界を下限界、過濃側の限界を上限界といい、これらの限界の間で引火・燃焼が起こる。可燃性ガスが漏洩し大気中に拡散した場合には希薄側の濃度の限界、つまり爆発下限界が問題になる。

一般に、ガス拡散モデルで求められるガス濃度は時間平均濃度であり、実際のガス濃度はこの値のおよそ 1/2～2 倍の範囲で変動するといわれている。このことは、算定濃度が爆発下限界の 1/2 程度のところでも引火する危険があることを意味し、この範囲内の人間に対して火傷などの危険があると考えられる。したがって、可燃性ガスの拡散に対しては、許容限界を爆発下限界の 1/2 とすることが妥当である。

### (4) 毒性ガス拡散の影響

急性毒性の許容濃度に関しては、国外の様々な機関において表 5.24 のような基準が示されている。IDLH は、現指針（平成 13 年）で影響の基準値とされてきたもので、主な毒性物質の値は表 5.25 に示すとおりである。AEGLs は、公衆に対する次の 3 段階の許容レベルが提唱されている。

- AEGL-1（不快レベル）：感受性の高いヒトも含めた公衆に著しい不快感や、兆候や症状の有無にかかわらず可逆的影響を増大させる空気中濃度しきい値である。これらの影響は、身体の障害にはならず一時的で曝露の中止により回復する。
- AEGL-2（障害レベル）：公衆に避難能力の欠如や不可逆的あるいは重篤な長期影響の増大が生ずる空気中濃度しきい値である。
- AEGL-3（致死レベル）：公衆の生命が脅かされる健康影響、すなわち死亡の増加が生ずる空気中濃度しきい値である。

AEGLs は、暴露時間（10 分、30 分、60 分、4 時間、8 時間）に応じて定められているため、防災アセスメントの ETA により抽出される災害事象（漏洩継続時間）の違いを反映できるという利点がある。AEGLs が設定されている物質は、2011 年 3 月 25 日時点で次のようになっており<sup>13)</sup>、米国 EPA の AEGL ホームページ（<http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/humanhealth.htm>）から入手することができる。

- 最終 AEGL：66 物質
- 中間 AEGL：192 物質
- 提案 AEGL：12 物質
- 待機 AEGL：46 物質

表 5.24 に示した各基準値の違いを、塩素を例にとって示すと表 5.26 のようになる。以上のことから、防災アセスメントにおける毒性ガスの基準値としては、これまでの IDLH、あるいは AEGLs（AEGL-2 または AEGL-3）を用いることが妥当と考えられる。

表 5.24 急性毒性の許容濃度に関する基準

基準	機関	内容
IDLH(Immediately Dangerous To Life or Health)	米国国立労働安全衛生研究所 (National Institute for Occupational Safety and Health : NIOSH)	30 分以内に脱出しないと元の健康状態に回復しない濃度。脱出を妨げる目や呼吸器への刺激の予防も考慮されている <sup>14)</sup> 。 <b>現指針（平成 13 年）に示されている。</b>
TLV-STEL(Threshold Limit Value - Short-term exposure limit)	米国産業衛生専門家会議(American Conference of Industrial Hygienists : ACGIH)	TLV は労働衛生上の許容濃度を示したものであり、1 日 8 時間、1 週間 40 時間の労働による安全限界を示した時間加重平均値である TWA (Time Weighted Average) と、短時間曝露限界値を示した STEL とがある。STEL は、15 分間継続的に曝露しても、①耐えられないほどの刺激、②慢性的または非可逆的な生体組織の損傷、③麻酔作用による障害事故発生の危険増加、自制心の喪失、または著しい作業能率低下の起こらない濃度の限界を表す。
AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels)	米国環境保護庁 (US Environmental Protection Agency : U.S. EPA)	公衆に対する有害物質のしきい値濃度であり、5 つの曝露時間（10 分、30 分、1 時間、4 時間、8 時間）のそれぞれに対し想定される健康被害を、3 段階のレベル（低濃度から AEGL-1、AEGL-2、AEGL-3）に分類して表している。
ERPG(Emergency Response and Planning Guidelines)	米国産業衛生協会 (American Industrial Hygiene Association : AIHA)	AEGL s と同様、公衆に対する有害物質のしきい値濃度を 3 段階のレベル（ERPG-1、ERPG-2、ERPG-3）に分類して表したものであるが、曝露時間は 60 分間のみで評価されている。

表 5.25 主な毒性物質の IDLH

毒性物質	IDLH(ppm)	毒性物質	IDLH(ppm)
アクリロニトリル	85	シアン化水素	50
アクロレイン	2	四塩化炭素	200
アセトニトリル	500	臭化エチル	200
アセトンシアンヒドリン	50	臭素	3
アニリン	100	硝酸	25
アリルアルコール	20	ジメチル硫酸	7
アンモニア	300	トルイジン	50
エタノールアミン	30	トルエン	500
エピクロロヒドリン	75	ニトロベンゼン	200
塩化水素	50	ヒ化水素	3
塩素	10	ヒドラジン	50
過酸化水素	75	フッ化水素	30
ギ酸	30	臭化水素	30
クロルメチル	200	塩化炭素(ハゲン)	4
クロルピクリン	2	ホルムアルデヒド	20
クロロホルム	500	メチルアミン	1000
酢酸エチル	2000	メチルメルカプタン	150
三塩化リン	25	ヨウ素	2
酸化エチレン	800	リン化水素	50
三フッ化ホウ素	25		

表 5.26 各基準による塩素の許容濃度 (ppm)

	IDLH	TLV-STEL	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
10 分			0.5	2.8	50			
15 分		1						
30 分	10		0.5	2.8	28			
60 分			0.5	2	20	1	3	20
4 時間			0.5	1	10			
8 時間			0.5	0.71	7.1			

### 5.2.3 影響度の推定

ET により抽出された災害事象について、以下の手順により影響範囲の算定を行い、周囲に与える影響の大きさを推定する。ただし、明らかに影響が小さいと考えられる事象については省略してもよい。

- 入力データの収集
- 気象条件の設定
- 漏洩口（開口部）の設定
- 影響範囲の算定

#### (1) 入力データの収集

対象施設を保有する事業所などから算定に必要なデータを収集する。収集データは対象施設の種類や適用モデルによって異なるが、主な項目は概ね次のとおりである。

##### ①施設データ

- 施設の種類、形式、規模（サイズ）
- 取扱物質の種類、名称
- 取扱物質の量（貯蔵量、滞留量）
- プロセス条件（温度、圧力、流量、濃度、相など）
- 防油堤・防液堤の面積、接続配管径

##### ② 物性データ

- 密度（液密度、蒸気密度）
- 分子量（モル重量）
- 比熱比
- 飽和蒸気圧
- 蒸発潜熱（沸点）
- 燃焼熱量
- 爆発下限界濃度
- 燃焼速度（液面降下速度）
- 放射発散度

#### (2) 気象条件の設定

参考資料2に示したようなガス拡散モデルを用いて可燃性ガスや毒性ガスが漏洩したときの拡散濃度を算定するためには、風速と大気安定度を特定する必要がある。これらについては、出現頻度が高いかあるいは条件が悪いいくつかのケースを設定し、それぞれに対して影響範囲を算定することになる。なお、気象データは、できるだけ石油コンビナートの内部あるいは直近で観測されたものを使用する。

### (3) 漏洩口（開口部）の設定

参考資料 2 に示したような流出モデルにより危険物質の流出率を算定するためには、漏洩口の大きさを想定する必要がある。漏洩口の想定は、モデルの選定以上に算定結果に影響を与える。しかし、危険物施設や高圧ガス施設での事故データに漏洩口に関する項目は含まれておらず、個々の施設の構造的特性を考慮して専門的判断に基づいて仮定することになる。

小破漏洩に関しては、これまでタンクや塔槽類に接続する配管断面積の 1/100 といった漏洩口がよく想定されている（タンク本体の場合はこれと同程度の漏洩口とする）。ただし、配管径が大きくなると過大評価になる可能性があり、適当な上限を設ける必要がある。このほかに、接続配管のフランジボルトの 1 つが破損してある幅の隙間が開くといった想定が用いられることもある。この場合も隙間の幅は仮定による。

大破流出に関しては、仕切堤や防油堤内の全面流出に直結するため、特に漏洩口を設定する必要がない場合が多い。設定する必要がある場合には、状況に応じてタンクや塔槽類に接続する配管の破断のような想定を行うことになる。

### (4) 影響範囲の算定

対象施設で起こりうる災害事象について、選定したモデルを適用して災害の影響範囲（災害に伴う物理的作用の強度が基準値以上となる範囲）を算定する。算定結果から影響度を推定する場合には、範囲の大きさだけでなく、そのなかに含まれる人口や一般施設、あるいは算定で考慮していない施設のまわりの構造物や自然地形による影響防止効果などもできるだけ考慮することが望ましい。

### 5.3 総合的な災害危険性（リスク）の評価

災害の発生危険度と影響度をランクに分け、両者をあわせてリスクマトリックスによる評価を行い、防災計画策定において想定すべき災害の抽出を行う。

#### (1) 平常時のリスク評価・災害想定

平常時におけるリスクマトリックスとこれに基づく災害想定の一例を図 5.7 に示す。この例では、災害発生危険度に対して、井上（1980）による  $10^{-6}$  /年という安全水準<sup>15)</sup> を C レベルとし、これ以上の頻度で発生すると考えられる災害を想定災害として取り上げ、影響度は災害の優先度を検討するうえでの指標として用いている。

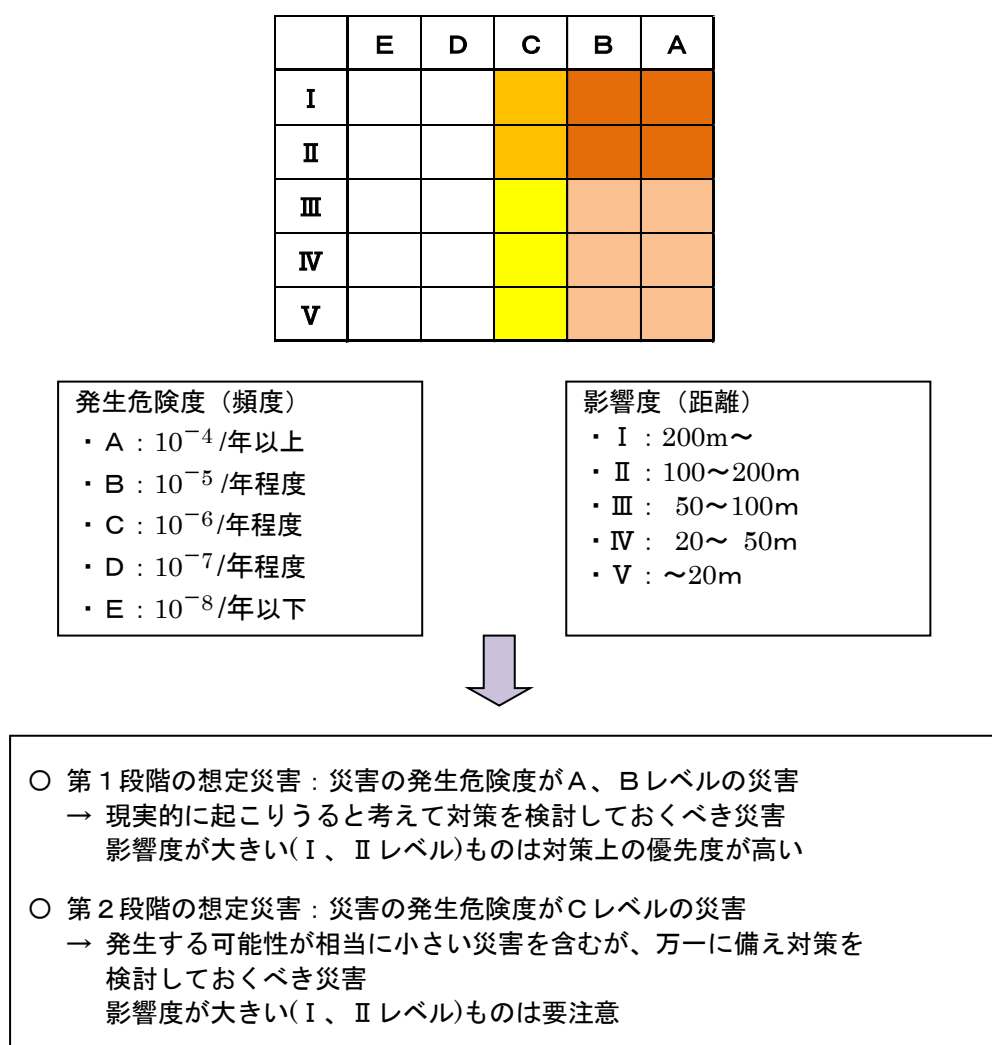


図 5.7 リスクマトリックスによる想定災害抽出の一例（平常時の災害）

影響度について、図 5.7 の例では単に影響の及ぶ距離をもとに設定しているが、ほかに「防災施設周辺」、「事業所敷地内」、「石油コンビナートの区域内」、「石油コンビナートの区域外に多少の影響」、「石油コンビナートの区域外に重大な影響」といったような設定も考えられる。

## (2) 地震時のリスク評価・災害想定

地震時のリスク評価についても同様であるが、地震が発生したときの被害確率として表した災害発生危険度に対して、どのレベルまでを想定災害として取り上げるかということが問題になる。1つの方法として、地震の発生頻度を考慮し、これと地震時の被害確率を掛け合わせた値が  $10^{-6}$  /年となるようなレベルを目安とすることが考えられる。5.2.2 で述べたように、地震時の災害発生危険度は、原則として地域防災計画と同一の震源を想定し、これが発生したときの被害確率で表すとしている。しかしながら、リスクマトリックスにおいて平常時と同等の発生レベルの災害を取り上げようとすると、想定地震の発生頻度を考慮せざるを得ない。文部科学省の地震調査研究推進本部が公表している地震の長期評価では、発生する危険性を 10 年、30 年、50 年、あるいは 100 年以内に発生する確率として表している。30 年以内の発生確率に着目して、1 年あたりの発生頻度に変換すると表 5.27 に示すような値になる。

表 5.27 地震の長期評価結果と発生頻度との対応

30 年以内 発生確率(%)	発生頻度 (/年)	再来期間 (年)
0.5	$1.7 \times 10^{-4}$	5985
1	$3.3 \times 10^{-4}$	2985
2	$6.7 \times 10^{-4}$	1485
3	$1.0 \times 10^{-3}$	985
4	$1.4 \times 10^{-3}$	735
5	$1.7 \times 10^{-3}$	585
10	$3.5 \times 10^{-3}$	285
20	$7.4 \times 10^{-3}$	135
30	$1.2 \times 10^{-2}$	85
40	$1.7 \times 10^{-2}$	59
50	$2.3 \times 10^{-2}$	44
60	$3.0 \times 10^{-2}$	33
70	$3.9 \times 10^{-2}$	25
80	$5.2 \times 10^{-2}$	19
90	$7.4 \times 10^{-2}$	14

このような考え方に基づく、地震時の災害想定にあたっての発生危険度に関する目安は、例えば次のようになる。

- 30 年以内に数%の確率で発生する地震（陸域の活断層での地震）

地震の発生頻度は  $10^{-3}$  /年程度であり、地震時の被災確率が概ね  $10^{-3}$  以上となる災害を想定災害として取り上げる。

- 30 年以内に数 10%の確率で発生する地震（海溝型地震）

地震の発生頻度は  $10^{-2}$  /年程度であり、地震時の被災確率が概ね  $10^{-4}$  以上となる災害を想定災害として取り上げる。



○ 30 年以内に 90%の確率で発生する地震（東海地震：88%）

地震の発生頻度は  $10^{-1}$ /年程度であり、地震時の被災確率が概ね  $10^{-5}$  以上となる災害を想定災害として取り上げる。

しかしながら、陸域の活断層での地震は、海溝型地震に比べて発生間隔が 1 桁以上大きく、確率の値が小さくとも発生する可能性がある。例えば、兵庫県南部地震（1995）は、30 年以内の発生確率が 0.4～8 %の時点で発生している<sup>16)</sup>。このようなことを考慮すると、地震時のリスク評価においては、地震時の被災確率が概ね  $10^{-4}$  ～ $10^{-5}$  程度の災害を想定災害として取り上げることが妥当と考えられる。

### (3) 低頻度大規模災害の扱い

今回の東日本大震災における石油コンビナート施設の全体的な被害状況（短周期地震動による）を見ると、上記の考え方により概ね妥当な評価（災害想定）が行えると考えられる。ただし、特殊ケースであったとしても、市原市の LPG タンク爆発火災のような大規模災害が発生した以上、これを無視することはできない。このような大規模災害は、配管やタンクの大破に端を発し、周辺施設も巻き込んで大規模な爆発や火災に発展するもので、従来の防災アセスメント（リスクマトリックスによる評価）では、影響は甚大であっても発生確率が極めて小さいとして想定されないことが多かった。

しかし、今回の地震で、施設の耐震強度や安全対策を考慮した確率的な評価では想定外と見なされても、現実にはこれまで思いもよらなかった原因により（評価上の発生確率よりも高い確率で）発生し得ることがわかった。したがって、評価上の発生確率は極めて小さくなったとしても、発生したときの影響が甚大な災害については想定災害として取り上げ、確率には言及せずに影響評価を行うなどして周辺住民の安全を確保するための対策を検討しておく必要がある。このような大規模災害は、施設、事業所、石油コンビナートの立地条件に依存して拡大するため、単独災害とは切り分けて第 7 章で検討する。このような災害想定の方法を図 5.8 に示す。

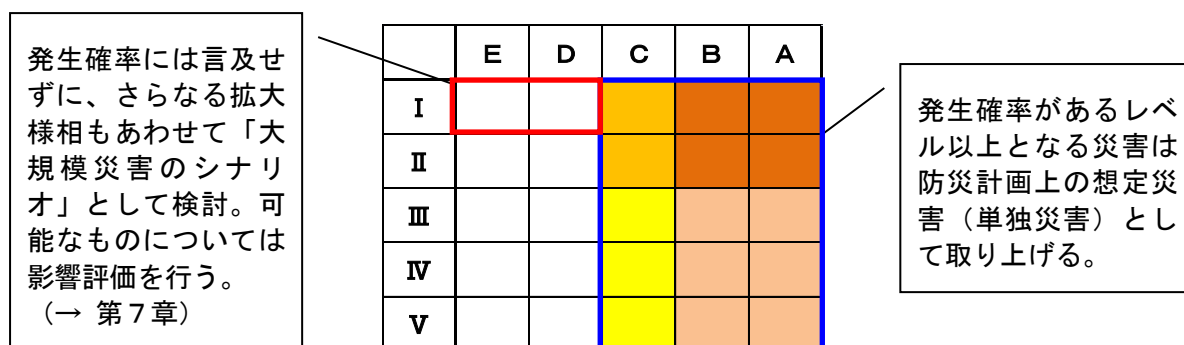


図 5.8 リスクマトリックスによる災害想定の方法

## 第5章 参考文献

- 1) 消防庁危険物規制課：阪神・淡路大震災に係る屋外タンク貯蔵所の被害状況現地調査結果報告書, 1995
- 2) 危険物保安技術協会：危険物施設の耐震性に関する調査報告書, 1996
- 3) 消防庁危険物保安室・特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書, 2011
- 4) (財)消防科学総合センター：石油コンビナートの防災アセスメントに係る調査研究報告書, 2000
- 5) 長谷見雄二・重川希志依：火災時における人間の耐放射熱限界について, 日本火災学会論文集, Vol.31, No.1, 1981
- 6) 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策定指針, 1994
- 7) STOLL, A.M. and CHIANTA, M.A., Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. Aerospace Medicine, 40, 1969
- 8) 危険物保安技術協会：石油コンビナートに係る防災対策調査検討報告書, 2003
- 9) 難波桂芳監修, 平野敏右・堤内學編：爆発防止実用便覧, サイエンスフォーラム, 1983
- 10) 山本祐徳：爆発と被害, 工業火薬協会誌, Vol.22, No.1, 1961
- 11) Hirsch, F.G. : Effects of Overpressure on The Ear-A Review, Annals of the New York Academy of Science, Vol.152, Art.1, 1968
- 12) V.J.Clancey : Diagnostic Feature of Explosion Damage, Sixth International Meeting of Forestic Science, Edinburgh, 1972
- 13) 国立医薬品食品衛生研究所・AEGL 情報  
(<http://www.nihs.go.jp/hse/chem-info/aeglindex.html>)
- 14) 米国国立労働安全衛生研究所 (NIOSH) ホームページ  
(<http://www.cdc.gov/niosh/idlh/idlhintr.html>)
- 15) 井上威恭：社会的に許容される安全水準, 高圧ガス, Vol.17, No.5, 1980
- 16) 島崎邦彦：大地震発生の長期的予測, 地学雑誌, Vol.110, No. 6, 2001

## 第6章 長周期地震動による被害の評価

長周期地震動によるスロッシング被害の評価は、想定地震の予測波形から得られる速度応答スペクトルがベースとなる。これをもとに、個々の危険物タンクでのスロッシング波高を求め、その大小から災害拡大シナリオに現れる各災害事象の可能性を判定し、災害規模に応じた影響を算定する。なお、スロッシングに関しては 2003 年十勝沖地震での被害を踏まえ、長周期地震動の地域特性に応じた特定タンク液面の低下措置や、シングルデッキタイプの浮き屋根の技術基準が制定されるなどの対策が取られており、これを考慮したうえで以下の評価を行う。このようなスロッシング被害に関する評価手順は以下のとおりである。

### 6.1 速度応答スペクトルの算定

応答スペクトルとは、いろいろな固有周期を持つさまざまな建物や構造物に対して、地震動がどの程度の強さの揺れ（応答）を生じさせるかを示すもので、建物や構造物と同じ特性（固有周期と減衰定数）を持った振動子の揺れの最大値として計算される（図 6.1）。応答スペクトルには、揺れの変位、速度、加速度に応じて、変位応答スペクトル（ $S_D$ ）、速度応答スペクトル（ $S_V$ ）、加速度応答スペクトル（ $S_A$ ）がある。

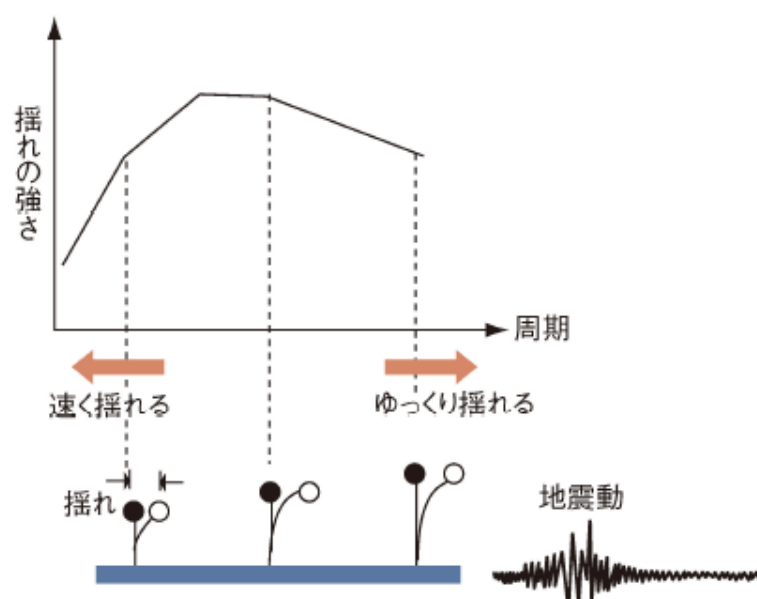


図 6.1 応答スペクトルの模式図<sup>1)</sup>

変位、速度、加速度応答スペクトルの間には、揺れの周期を  $T$  として、近似的に次のような関係がある。

$$S_D \doteq (T/2\pi) \cdot S_V$$

$$S_V \doteq (T/2\pi) \cdot S_A$$

この関係を用いて加速度応答スペクトルから計算した速度応答スペクトルを疑似速度応答スペクトルと呼ぶ。以下に示すようなスロッシング波高の計算では、通常この疑似速度応答スペクトルが

用いられる<sup>2)</sup>。

応答スペクトルを計算するもとになる地震予測波形は、想定地震に対する地震動予測を実施した機関から入手することになるが、長周期地震動を考慮できていない手法による予測波形は用いることができないことに留意する必要がある。なお、応答スペクトルを計算するときの減衰定数（h）は、評価対象とする危険物タンクの種類によって異なり次のようになる<sup>3)</sup>。

- 浮き屋根式タンク（ダブルデッキ）：0.01（1%）
- 浮き屋根式タンク（シングルデッキ）：0.005（0.5%）
- 固定屋根式タンク（内部浮き蓋付き）：0.005（0.5%）
- 固定屋根式タンク：0.001（0.1%）

## 6.2 スロッシング波高の算定

次式により、個々のタンクのスロッシング波高を計算する。

$$\eta = 0.837 \left( \frac{D}{2g} \right) \left( \frac{2\pi}{T_s} \right) S_v(T_s)$$
$$T_s = 2\pi \sqrt{\left( \frac{D}{3.682g} \right) \coth \left( \frac{3.682H}{D} \right)} \quad (\text{式 6.1})$$

ただし

$\eta$ ：スロッシング最大波高（m）

D：タンク内径（m）

H：液面高さ（m）

g：重力加速度（9.8m/s<sup>2</sup>）

T<sub>s</sub>：タンクのスロッシング基本固有周期（s）

S<sub>v</sub>(T<sub>s</sub>)：周期 T<sub>s</sub> における速度応答スペクトル（疑似速度応答スペクトル：m/s）

$$\coth(X) = \frac{e^X + e^{-X}}{e^X - e^{-X}}$$

また、式 6.1 は微小波高を仮定したもの（線形解）であり、溢流が生じるような大きなスロッシングの場合は、非線形性の影響による波高増分を考慮する必要がある。

非線形性を考慮したスロッシング最大波高は、西晴樹・他（2008）により次式が提案されており、2003 年十勝沖地震での事例から適用性が確認されている<sup>4)</sup>。

$$\eta^+ = \eta + \Delta \eta$$
$$\Delta \eta = 0.91R(\eta/R)^2 \quad (\text{式 6.2})$$

ただし

$\eta^+$ ：非線形性を考慮したスロッシング最大波高（m）

$\eta$ ：スロッシング最大波高（式 6.1 による線形解：m）

$\Delta \eta$ ：非線形液面増分（m）

R：タンク半径（m）

### 6.3 溢流量の推定・流出火災の想定（浮き屋根式）

スロッシング最大波高（ $\eta^+$ ）がタンクの余裕空間高（満液時）を上回る場合には、溢流ありと判断しスロッシングによる溢流量（ $\delta v$ ）を計算する（計算方法は参考資料3に示す）。さらに、 $\delta v$ の大小、油種に応じて流出火災の想定を行う（図6.2）。

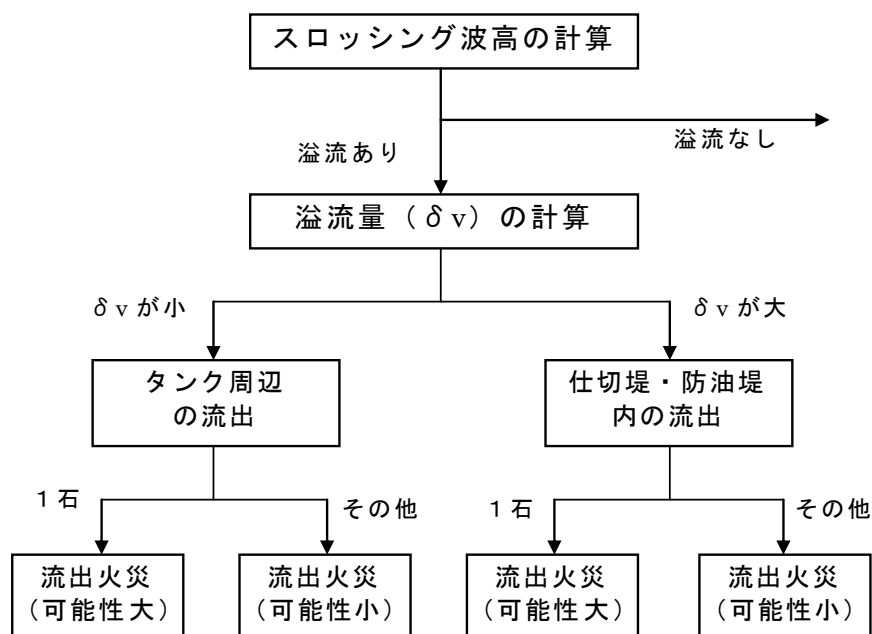


図 6.2 溢流量の推定・流出火災の想定の方

### 6.4 タンク火災の想定（浮き屋根式）

スロッシングによりタンク全面火災となった場合には、周囲に大きな影響を及ぼすだけでなく、消火活動も困難で長時間を要し、さらなる大規模災害に拡大する危険性も否定できない。全面火災に至る引き金となる事象としては、浮き屋根上への油の漏洩や浮き屋根ポンツーンの損傷などがあるが、これらの発生に影響を与える要因には次のものが考えられる。

- スロッシング波高（ $\eta^+$ ）の大きさ
- 浮き屋根の構造（シングルデッキ、ダブルデッキ）
- 浮き屋根耐震基準（平成 17 年総務省告示第 30 号）の適合状況（適合、未適合、非該当）

また、火災となるかどうかは油種（引火点）にも依存する。これらをもとに、タンク屋根で火災となる危険性を判定し、危険性ありと判断されるものについては全面火災を想定した対策が必要になる。一般的に、第 1 石油類を貯蔵したシングルデッキで、浮き屋根耐震基準に未適合で、かつスロッシング波高が大きい場合には、全面火災が発生する危険性が相対的に高いといえる。なお、原油を貯蔵したタンクで全面火災となって早期に鎮火できない場合には、ボイルオーバーが発生して大量の油が燃えながら噴出するといった災害も考慮しておく必要がある。

危険性の判定にあたっては、以下の被害事例等を参考にする。2003 年十勝沖地震での苫小牧における危険物タンクの被害状況を図 6.3 に示す。この図において、横軸はタンクのスロッシング固有周期、縦軸は式 6.1 によるスロッシング最大波高、塗りつぶしたシンボルは何らかの被害があった

タンク、丸で囲んだシンボルは火災や浮き屋根の沈降という甚大な被害があったタンク、またはボンツーン内に油が確認され沈降の恐れがあったタンクを示している。これから、甚大な被害またはその恐れがあったタンクは、1例を除いてシングルデッキの浮き屋根式タンクであり、周期 12 秒付近のタンクを除いて最大波高は 2 m 以上であることがうかがえる。周期 12 秒付近のタンクは、2 次モード（周期 5、6 秒）が卓越したことが浮き屋根沈降の原因とされており、1 次モードによる式 6.1 だけで単純に評価できないこともある。

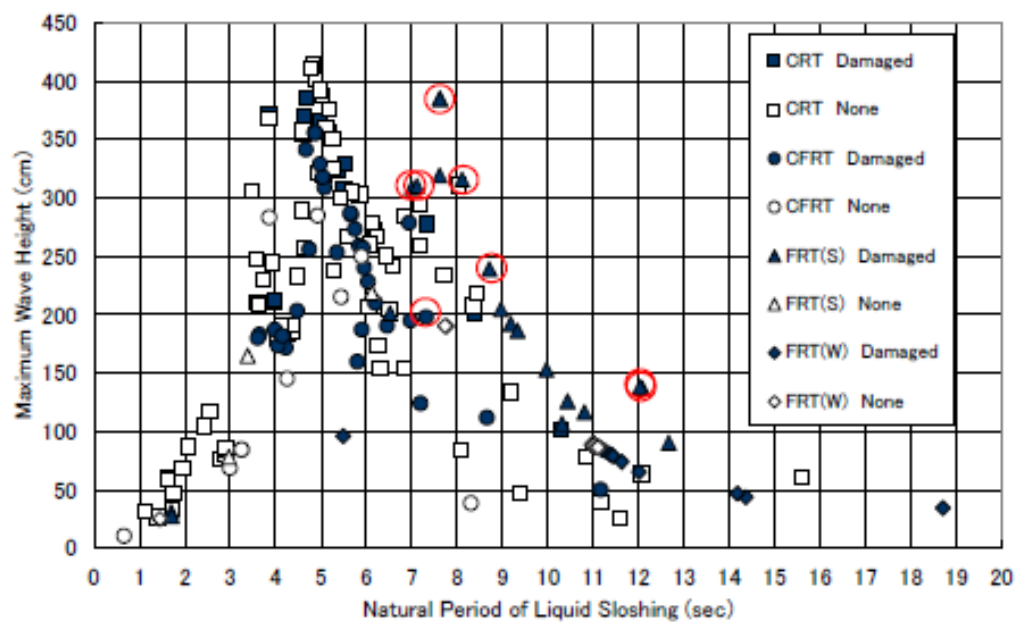


図 6.3 十勝沖地震（2003）での苫小牧における危険物タンクの被害状況<sup>5)</sup>

東日本大震災における浮き屋根式タンクの被害状況は表 6.1 に示すとおりである。これによると、何らかの被害があったシングルデッキのタンク 36 基の中で、24 基が耐震基準未適合でこのうち 5 基でボンツーン内への漏洩（油の浸入）が認められている。一方、適合済みのタンクでは、4 基で被害があったがすべて軽微なものである。ダブルデッキのタンクでも、9 基でボンツーン内への漏洩が見られたが、この浮き屋根は浮力に十分な余裕があり、多少の漏洩があっても沈下や傾斜に至ることはない。浮き屋根耐震基準に該当しないタンク 3 基で漏洩が発生しており、これらについては注意が必要である。

表 6.1 東日本大震災における浮き屋根式タンクの被害状況<sup>6)</sup>

浮き屋根の種類		耐震基準対象		適合別		危険物流出の有無	
シングル デッキ	36	該当	28 (398)	適合済	4 (51)	流出有	0
						流出無	4
				未適合	24 (347)	流出有	5
						流出無	19
		非該当	7 (247)	流出有		3	
				流出無		4	
		不明	1	流出有		0	
				流出無		1	
ダブル デッキ	16 (314)	流出有					9
		流出無					7

注 1) 括弧内は調査対象の都道府県に設置されている当該区分の総基数

#### 6.5 ドレン排水口からの流出想定（浮き屋根式）

浮き屋根式タンクでは、浮き屋根上に漏洩した油がドレン排水口から流出したり、タンク内部でドレン配管が破損して排水口から流出するような事象が考えられる。前者の場合には流出量は少量にとどまるが、後者の場合には大量に流出して仕切堤や防油堤内に滞留することもあり得る。大量流出の可能性は、予想されるスロッシング波高、ドレン排水口の遮断方式などに依存する。このような流出は、6.3 の溢流と同様の結果を引き起こすことから、両者を合わせて起こり得る流出火災の想定を行う。

#### 6.6 内部浮き蓋付きタンクの災害想定

スロッシングによりタンク内の浮き蓋が損傷し、油が浮き蓋上に溢流、あるいは浮き蓋が沈降した場合には、タンク上部の空間に可燃性蒸気が滞留し、通気口からの空気の流入により可燃性ガス濃度が爆発範囲内となって爆発・火災が発生する危険性がある。

図6.3には、2003年十勝沖地震での内部浮き蓋付きタンクの被害が丸いシンボルで示されている。このうち、黒丸のシンボルで示されたものが何らかの被害があったタンクであり、浮き屋根式タンクと同様にスロッシング波高が2 m以上になると被害が顕著になることが確認されている<sup>7)</sup>。

浮き蓋付タンクの爆発・火災の引き金となる事象は、浮き蓋上部の気相部への可燃性蒸気の滞留であるが、これらの発生に影響を与える要因としては主に次のものが考えられ、これらをもとに爆発・火災の危険性がありと判断されるものについてはタンク全面火災が想定される。

- スロッシング波高の大きさ
  - 内部浮き蓋の形式
  - 可燃性蒸気の滞留し易さ（排出設備による有効な排出の可否、不活性ガス充填による運用）
  - 内部浮き蓋の技術基準（平成 23 年総務省令第 165 号）の適合状況（適合、未適合、非該当）
- なお、東日本大震災では、ポンツーン型 209 基のうち 3 基で軽微な被害、簡易フロート型 579 基

のうち1基で浮き蓋沈降、6基で軽微な被害が発生している。

## 6.7 固定屋根式タンクの災害想定

危険物タンクの固定式屋根は放爆構造がとられていることから、スロッシングにより内容物が屋根に衝突すると、側板との接合部を破損し内容物が溢流する可能性がある。このような事例は1964年の新潟地震で確認されており、容量2万kl、直径約45mの固定屋根式タンク2基において、総量約2千klの重油が防油堤内に溢流している。このときのスロッシング最大波高は3m(推定値)、液面上の空間高さは約2mであった。また、2003年十勝沖地震でも、固定屋根式タンク1基において、側板と屋根接合部を突き破って溢流する事例が確認されている<sup>8,9)</sup>。

このような災害事象の発生は、タンク貯蔵量と予想されるスロッシング波高の大きさによるが、波高が屋根に達したときの破損の有無や溢流量を推定することは難しい。したがって、波高が屋根に達する場合には破損の可能性ありと判断し、溢流量は波高が側板上端を上回る程度から大まかに推定して流出火災の規模を想定することになる。

## 6.8 想定災害の影響評価

上記の検討により次のような大規模な火災が想定される場合には、放射熱の算定を行い周囲への影響を評価する必要がある。

- 仕切堤内の火災
- 防油堤内の火災
- タンク全面火災
- タンク全面及び防油堤内の火災



## 第6章 参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部ホームページ  
([http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/glossary/response\\_spectrum.htm](http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/glossary/response_spectrum.htm))
- 2) 坂井藤一：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二,三の提案, 圧力技術, Vol18, No.4, 1980
- 3) 座間信作, 西晴樹, 廣川幹浩, 山田實, 畑山健：石油タンクのスロッシングの減衰定数, 消防研究所報告 98, 2004
- 4) 西晴樹, 山田實, 座間信作, 御子柴正, 箕輪親宏：石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定, 圧力技術, Vol46, No.5, 2008
- 5) 座間信作：2003年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策, 物理探査, Vol59, No.4, 2006
- 6) 消防庁危険物保安室・特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書, 2011
- 7) 消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書, 2011
- 8) 太田外氣晴, 座間信作：巨大地震と大規模構造物ー長周期地震動による被害と対策ー, 2005
- 9) 座間信作：石油タンクのスロッシングと対策, 名城大学 高度制震実験・解析研究センター 第2回講演会資料, 2008

## 第7章 大規模災害の評価

ここでいう大規模災害とは、「第4章 災害の発生・拡大シナリオの展開」で述べたように、石油類が防油堤外さらには事業所外に拡大したり、石油類や可燃性ガスの火災・爆発が隣接施設を損傷してさらに拡大していくような場合である。このような災害は、第5章 5.3 で述べた単独災害のリスクマトリックスにおいて、発生危険度が非常に小さく影響度が大きいとされる災害がさらに拡大したものと考えられ、従来の防災アセスメントではほとんど想定されていなかった。

しかしながら、東日本大震災では、LPG タンクの倒壊に端を発し、4 基のタンクが爆発・炎上してヤード内の多くのタンクを破損し、さらに隣接施設や隣接事業所にも被害を与えた。この事故を踏まえて対策が検討・実施されることから、今後同様の事故は起こりにくくなるといえるが、別の予期していない要因により同様あるいは別の形態の大規模災害が発生する可能性は否定できない。

今回の事故が、114gal（震度 5 弱）の地震動（事業所の観測値）を受けて起こったことを考えると、第5章 5.1.2 で述べた脆弱性曲線をベースとした確率的評価でこのような事故の発生を妥当に（現実的なものとして）評価することは極めて難しいといえる。したがって、ここでは発生確率には言及せず、施設の構造・強度、防災設備（特に散水設備や防油堤・防液堤の状況等）、周辺施設の状況、立地条件（地形環境）などから現実的に起こり得ると考えられる災害を想定し、可能なものについては影響の算定を行い、万一に備えた周辺住民の避難対策等に資するものとする。

### 7.1 危険物タンクの災害

危険物タンクについては、第4章で例示した単独災害の E T 図（1-1～1-4）において、防油堤内で流出あるいは火災が拡大した以降の災害として、次の 2 つのシナリオを取り上げる。

- 防油堤から海上への流出（第4章 E T 図 5-1）
- 防油堤火災からの延焼拡大（第4章 E T 図 5-2）

このような災害は、タンク本体あるいは配管の大破に起因するもので、現在の技術基準からすると考えにくい。施設の老朽化、施工不良、あるいは管理体制の問題など評価が困難な要因により発生する可能性は否定できない。なお、これ以外の災害については、それぞれの石油コンビナートの状況を踏まえて独自に検討されたい。

#### 7.1.1 防油堤から海上への流出

タンクから石油類が大量に流出し、防油堤や流出油等防止堤が地震や液状化の影響で大きく損傷した場合には、流出油は事業所外の陸上あるいは海上に拡大していく可能性があるが、このような状況は地面の微妙な傾斜や起伏だけでなく広大な堤の損傷個所にも依存するため事前に拡大様相を把握することは難しい。ただ、流出油等防止堤が健全であったとしても、油が排水溝を通して海上に流出する可能性もある。

1978 年の宮城沖地震では、仙台地区にある 3 基の重油タンク（20,000～30,000 kℓ）の側板と底板の接合部付近が破断し、約 70,000 kℓの重油が流出した。陸上での拡大は流出油等防止堤で防止できたが、一方では排水溝を通してガードベースン（容量 6,000 kℓ）に流出した。直ちに港湾に通ずる排水口の緊急遮断ゲートの閉鎖を行ったが、ヘドロが堆積していたため完全に閉鎖できず、土

のうやダンプによる土砂の搬入等により封鎖を完了するまでに数千klが海上に流出した。しかしながら、海上に流出した重油の大半は第1次オイルフェンスでくい止めることに成功した（図7.1）。

このような事故は、現在では技術基準の強化などにより当時よりは起こりにくくなっていると考えられるものの、やはり起こり得ることを想定し、発災時の影響（被害）を低減するための対策を検討しておく必要がある。その場合の評価手順は概ね次のようになる。

- ① 地震により破損し海上流出に至る可能性が考えられるタンク・タンクヤードの選定（想定地震動、技術基準、立地条件、地盤条件などを考慮）。
- ② 流出量の推定。
- ③ 排水溝を通過して海上に至るルートの確認。
- ④ ガードベースンの容量、常時のゲートの開閉状況、緊急時の閉止手段の確認。
- ⑤ 油種（1～3石）に応じたオイルフェンス展張、流出油の回収、着火源管理などの緊急措置の確認。

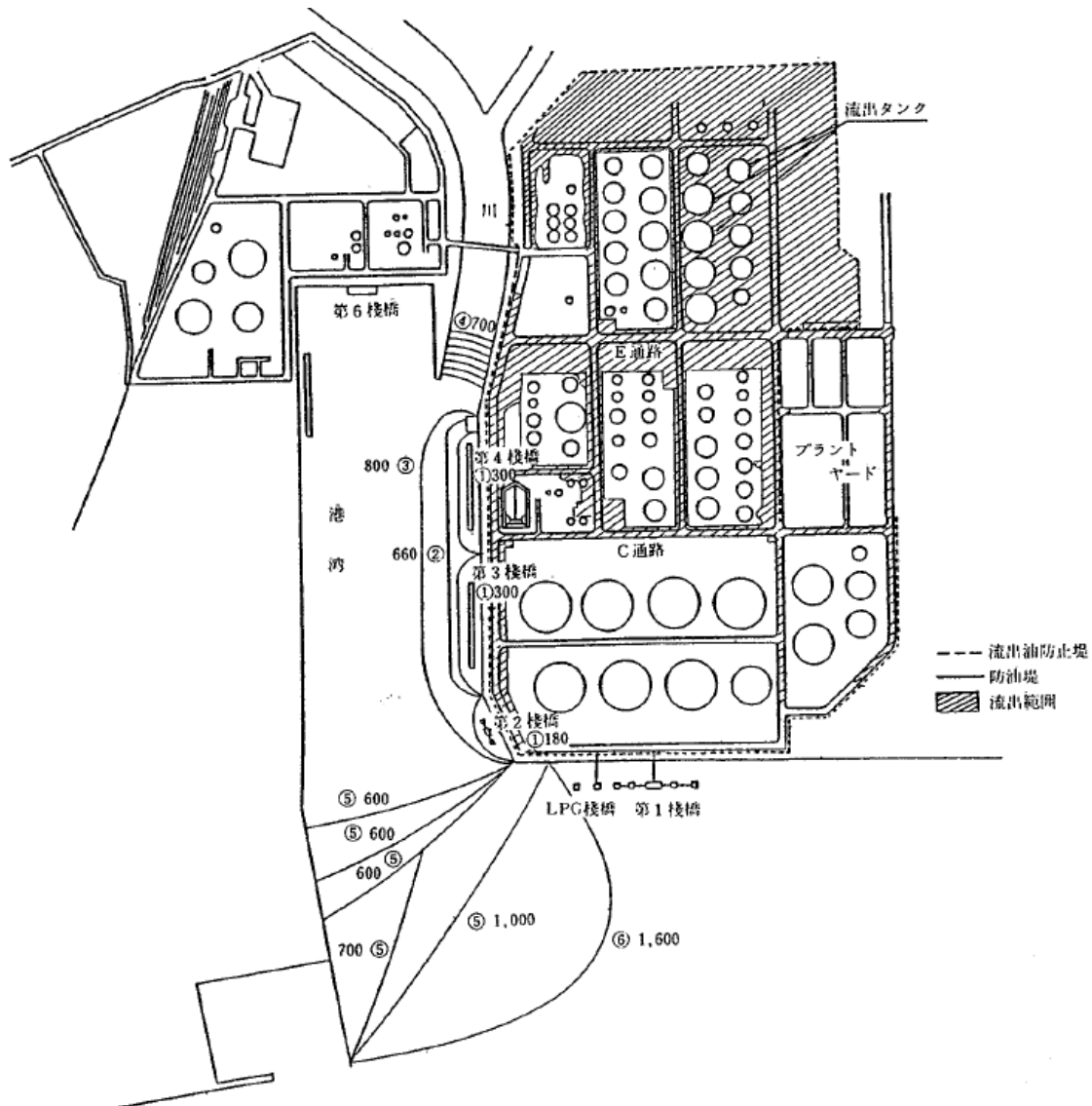


図 7.1 宮城県沖地震（1978）での重油流出範囲とオイルフェンスの展張状況<sup>1)</sup>

### 7.1.2 防油堤火災からの延焼拡大

宮城県沖地震（1978）での事故は、流出油が引火点の高い重油であったため、火災に至る可能性はあまり問題にはならなかった。これがもし原油などの第1石油類で、着火して図7.1の流出範囲で火災になったとしたら深刻な事態に至ったことは容易に想像できる。これより前の新潟地震（1964）では、スロッシングにより5基の原油タンク（30,000～45,000kℓ）の上部から溢流し、火災となってタンク群が全面炎上した。さらに、地震により防油堤が破壊されたため流出火災は図7.2に示す範囲に拡大し、付近の民家にも延焼した。

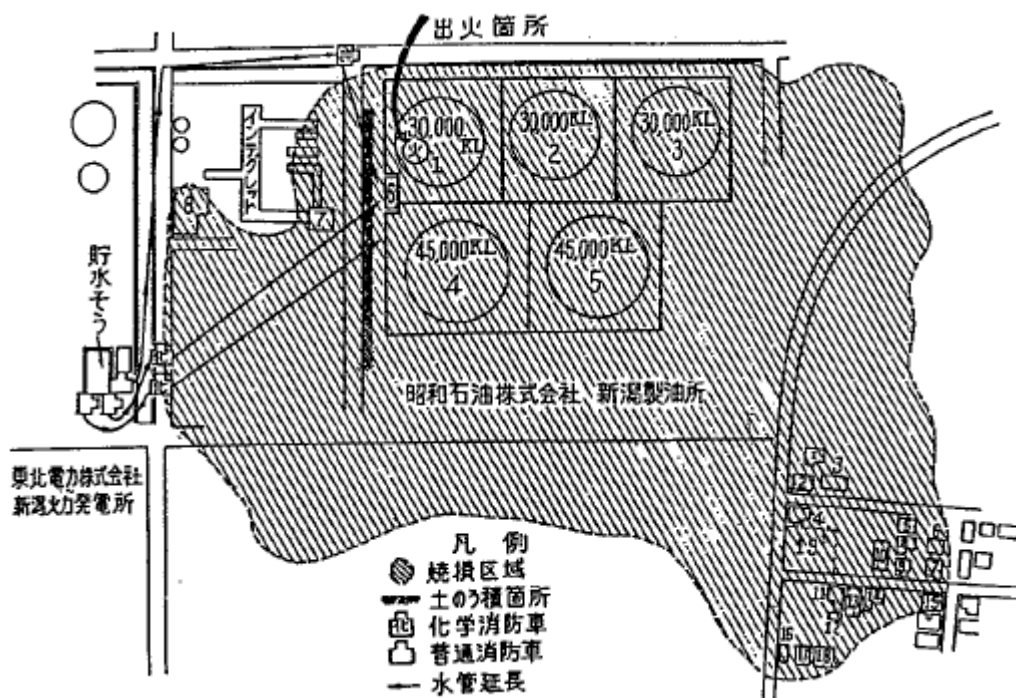


図 7.2 新潟地震（1964）でのタンク群火災の焼損範囲<sup>1)</sup>

現状では耐震基準が強化された大規模タンクよりも、比較的脆弱とされる準特定タンク（新基準未適合）や特定外タンクでの火災に注意すべきといえる。これらのタンクは、貯蔵量は少ないものの、多くのタンクが仕切られることなく1つの防油堤の中に設置されており、もしも1基のタンクから流出して火災になると、周りのタンクを焼損して火災が防油堤全面に拡大する危険性がある。地震により防油堤が損傷した場合には、火災はさらに拡大し、周辺の施設に影響を及ぼすことも考えられる。

石油類の流出火災については、拡大範囲（火災面積）を推定して放射熱の影響を算定・評価することになるが、これができるのは火災が防油堤内にとどまる場合に限り、防油堤外に拡大するような場合は予測不能である。また、周辺のタンクやプラントなどの施設がどの程度の放射熱を受けると損傷するかの判断も難しいが、法令に基づいたレイアウトでは火災が防油堤内にとどまる限りは大きな影響はないと考えられる。

以上のことから、危険物タンクにおける大規模火災の評価手順は概ね次のようになる。

① 地震により破損し大規模火災に至る可能性が考えられるタンク・タンクヤードの選定（想定地

震動、技術基準、立地条件、地盤条件、単独災害の評価結果などを考慮)。

- ② 流出量、流出範囲、火災拡大範囲の推定。
- ③ 放射熱による影響の算定・評価（ただし防油堤内の火災に限られる）。
- ④ 周辺施設の冷却などの緊急措置の確認。周辺住民の安全確保対策の検討。

## 7.2 高圧ガスタンク（可燃性）の災害

東日本大震災における LPG タンク爆発火災は、満水のタンクの倒壊に端を発し、これにより LPG 配管が破損して火災となり、BLEVE<sup>\*</sup>により次々と隣接タンクが爆発して大規模火災に至ったものである。原因の1つとされるブレース溶接部の脆弱性については、平成 24 年度現在、ブレースの耐震性能の評価方法や補強方法についての検討が行われているところであり、平成 25 年度に耐震基準の見直しが予定されている<sup>2)</sup>。しかしながら、たかだか 100gal 程度の地震動でこのような大規模災害が発生したことを考慮すると、特に震度 6 強以上の強い地震が想定されるような場合には、同様の災害を想定して災害の影響等を評価しておくべきといえる。発端となる事象としては、タンクが倒壊しなくても、何らかの落下物、あるいは地震動や側方流動による配管破損による火災も考えられよう。このような災害の評価手順は概ね次のようになる。

### ① 対象とするタンク・タンクヤードの選定

東日本大震災で被災したタンクヤードは、個々のタンクが仕切られることなく 1 つの防液堤内に密集して設置されたものであった。このようなタンクヤードでは、何らかの原因で配管等が破損して火災になった場合には、隣接タンクが火災に包まれ BLEVE に至る危険性がある。これに対して、個々のタンクが防液堤で仕切られたタンクヤードでは、隣接タンクの散水冷却が有効に機能して単独火災でとどまる可能性が高いといえよう。

### ② 爆発・ファイヤーボールによる影響の算定・評価

タンクヤード内の個々のタンクが破損して爆発・ファイヤーボールが発生しときの影響（放射熱及び爆風圧）を算定する。BLEVE により隣接タンクが次々と爆発するような事態に至ったとしても、それぞれのタンクはある時間差をおいて爆発すると考えられ、影響範囲を把握するうえでは個々のタンクでの最大の影響を考慮しておけばよいといえる。

### ③ 評価結果に基づく対策の検討

評価結果に基づき、事業所における BLEVE の防止のための隣接タンクの冷却、タンクヤード全体の火災となったときの周辺施設の冷却などの緊急措置の確認、関係市町村における周辺住民の安全確保のための対策の検討を行う。

<sup>\*</sup> BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) とは、沸点以上の温度で貯蔵している加圧液化ガスの貯槽や容器が何らかの原因により破損し、大気圧まで減圧することにより急激に気化する爆発的蒸発現象である。典型的には、火災時の熱により容器等が破損して BLEVE を引き起こす。BLEVE の発生は内容物が可燃性のものに限らないが、可燃性の場合には着火してファイヤーボールと呼ばれる巨大な火球を形成することが多い。

## 第 7 章 参考文献

- 1) 消防科学総合センター：地域防災データ総覧 危険物災害・火災編，1986
- 2) 経済産業省商務流通保安グループ高圧ガス保安室：経済産業省産業構造審議会保安分科会高圧ガス小委員会 第 1 回資料 5 高圧ガス施設等の地震・津波対策の進捗状況について，2012

## 第8章 津波による災害の評価

津波による石油コンビナート施設の被害は、予想される浸水深をもとに評価することになり、これは国や都道府県が実施した津波浸水予測がベースとなる。東日本大震災での被害状況から、浸水深が概ね3 m以上となる場合には、危険物タンクや高压ガスタンクの転倒や移動などの直接的被害が発生し、内容物が大量に流出する危険性があるといえる。浸水深が3 m以下の場合には、直接的被害による大量流出の危険性は低くなるが、防油堤内への浸水が予想される場合には、その前の地震により流出した油が海水とともに拡大していくような事態も懸念される。

以下に、このようなタンクに関する津波被害の評価について述べるが、これ以外にも入出荷栈橋、ユーティリティ設備、保安・計装設備の損傷、あるいは危険物や高压ガスの容器、タンクローリーの流出など様々な被害が考えられることから、それぞれの石油コンビナートにおける詳細な浸水予測図を作成するなどして予想される被害を抽出し、津波到達時間を考慮した事前対策、発災時の緊急対応について十分に検討しておく必要がある。

### 8.1 危険物タンクの被害

#### 8.1.1 津波によるタンクの破損

津波により危険物タンクの配管や本体が破損する原因としては、波力・浮力によるタンクの移動や転倒、あるいは漂流物（船舶、流木、コンテナ、車両等）の衝突などが考えられる。前者については、消防庁から危険物タンクの浮き上がり及び滑動を判定するための被害予測ツールが示されており、これを活用して評価を行うことが可能である。一方、後者については、現時点で定量的に評価可能な手法等は示されていない。しかしながら、これらは、いずれも最終的に同様の結果（内容物の大量流出・拡大）を引き起こすことから、原因を現時点で評価可能な「津波によるタンクの移動」に代表させて評価することを考える。

消防庁は、平成 21・22 年度に「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討」を行い、ここで危険物タンクの浮き上がり、滑動、転倒、側板座屈の可能性を判定するための簡易手法を示している<sup>1)</sup>。この中で、タンクの浮き上がりと滑動（まとめて「移動」とする）については、東日本大震災の被害状況をもとに妥当性の検証を行い、有効との結果が得られたことから、前述の被害予測ツールとして作成、提供している（参考資料4参照）。ここでは、この被害予測ツールを適用して津波による災害想定を行うものとし、その手順は次のようになる。

#### ① 浸水深の把握・評価対象タンクの抽出

国や都道府県が実施した津波浸水予測の結果を受けて、石油コンビナートの浸水深を把握する。東日本大震災では、危険物タンクの配管、本体の被害ともに浸水深が概ね3 mを超えたところから発生したことが確認されているが、安全側の評価として浸水深が3 m以下であっても浸水区域にあるタンクはひととおり抽出して評価を行うものとする。

#### ② 津波による被害予測（浮き上がり・滑動の判定）

消防庁の被害予測ツールは、次の事項を入力して対象タンクの「浮き上がり」及び「滑動」の

可能性について判定するものである。

- タンクの許可容量、内径、自重（自重が不明な場合は内径をもとに概略値を算定）
- 内容液の比重
- 被災時の貯蔵率
- 津波最大浸水深（浸水面からタンク底板までの深さ）
- 津波最大流速

判定結果は、「浮き上がり」と「滑動」それぞれに対する安全率として出力され、この値が1以下になれば「可能性あり」ということになる。津波最大流速がわからないときには、これを与えなくても判定を行うことができる。この場合、標準的な津波の流れ（ $Fr \leq 0.9$ ）を仮定して判定しているが、このような仮定に基づいた予測結果は東日本大震災における危険物タンクの被害状況と高い相関があることが確認されている。

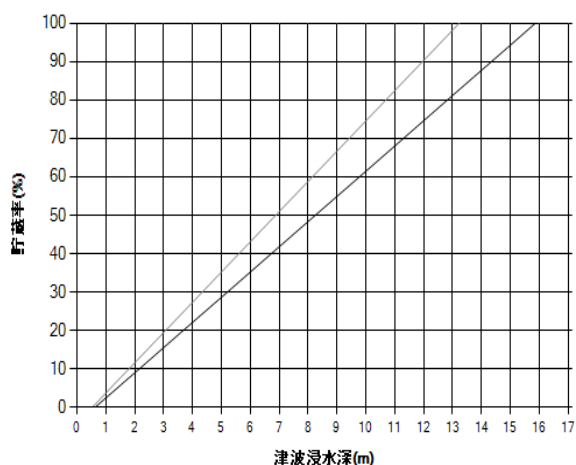
評価にあたっては、このツールを適用して、予想される津波の最大浸水深と最大流速に対して、安全率が1（ $\div 1$ ）になるときの貯蔵率を求めることになる。 $Fr \leq 0.9$  の場合には、被害予測ツールにより出力される安全率が1となる津波浸水深と貯蔵率との関係を表したグラフ（図 8.1 に示す  $Fr=0.9$  の曲線）を参考にすることができる。例えば、この図で5 mの浸水が予想される場合、貯蔵率が約30%以下であれば「浮き上がり」、約40%以下であれば「滑動」の可能性があるとこの判定になる。

#### 浮き上がり安全率=1になる津波浸水深(m)

タンク番号 T-001

タンク許可容量 6000(kl)

タンク内径 23.200(m)



#### 滑動安全率=1になる津波浸水深(m)

タンク番号 T-001

タンク許可容量 6000(kl)

タンク内径 23.200(m)

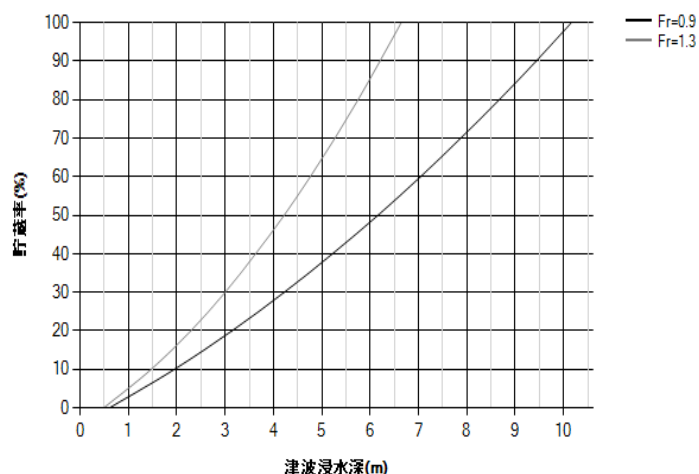


図 8.1 石油タンクの津波被害予測の結果<sup>1)</sup>

注)  $Fr$  はフルード数と呼ばれ、流体の慣性力の影響を表す無次元量であり、津波の浸水深（ $V$ ）と流速（ $\eta$ ）から次式により計算される（ $g$  は重力加速度）。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \eta}}$$



同じ浸水深であれば、Fr が大きいほど速い流れということになる。なお、このツールでは、V と  $\eta$  の同時性は考慮せずに、それぞれ最大浸水深、最大流速として計算して問題ないとしている<sup>1)</sup>。

### ③ 流出量の想定

消防庁の津波被害予測は、タンクの移動（浮き上がり、滑動）に関するものであり、「移動あり」と判定されたタンクが破損し流出するかどうかは判らない。また、流出しても、その箇所が配管であれば遮断弁を閉止する（津波来襲前に）ことによって阻止できるが、どこで流出するかも判らない。したがって、ここでは、安全側の評価として、「移動あり」と判定された場合は内容物のすべてが流出すると考える。

図 8.1 から判るように、移動に対するタンクの安全率は、ある津波浸水深に対して貯蔵率が少なくなるほど低くなり、貯蔵率がある値以下になると 1 を下回り「移動の可能性あり」と判定される。したがって、流出量を推定するためには被災時の貯蔵率を与える必要がある。一般の製油所や油槽所のタンクでは、貯蔵率は絶えず変化しており、ある時点の貯蔵率を与えて流出量を推定することは難しい。

そこで、例えば貯蔵率は 10～100% の間で一様に分布すると仮定し、発災時の流出量を期待値として求めることが考えられる。6,000 kℓタンクに関する図 8.1 の「滑動」のグラフを見ると（「浮き上がり」よりも「滑動」の方が安全率 1 となる貯蔵率が大きくなっている）、浸水深が 5 m とすると貯蔵率約 40% で安全率が 1 となっている。したがって、10% 刻みで計算すると流出量の期待値は次のようになる。

$$(6000 \times 0.1) \times 0.1 + (6000 \times 0.2) \times 0.1 + (6000 \times 0.3) \times 0.1 + (6000 \times 0.4) \times 0.1 = 600 \text{ kℓ}$$

このようにして算出した流出量を、浸水区域にあるすべてのタンクについて足し合わせたものを被災時の想定流出量とするという考え方である（備蓄タンクのように貯蔵率が常時 100% のものもあり、貯蔵率の変動については評価を行うときに事業所に確認する必要がある）。

なお、他の要因、例えばタンクの移動はなくても、漂流物の衝突などにより配管や本体が破損するような場合には、流出量は貯蔵率に関係なく上記の推定よりもかなり多くなる可能性がある。現状ではこのような場合の流出量を推定することは難しいが、浸水区域にある最大タンク 1 基の貯蔵量（満液相当）を上記の流出量に加えるという大雑把な想定も考えられる。

### ④ 流出油の拡大

津波により大量の油の流出が想定される場合には、大規模な火災となったり、流出油が海水とともに防油堤、流出油防止堤を超えて広範囲に拡がるような事態も懸念される。

東日本大震災では、仙台地区の製油所において、津波によりタンク元弁とローリー出荷設備をつなぐ配管が損傷して火災となり、出荷設備、ガソリタンク、アスファルトタンク、硫黄タンク等が焼損し、ガソリン等の危険物約 23,300 kℓが焼失した。この火災で、炎上タンクに隣接したガスタンクが爆発する危険性があったことから、発災場所から 2 km 圏内の住民に対して避難指示が発令された。延焼拡大の要因の 1 つとして、停電によりガソリタンクの緊急遮断弁が作動不能になり、火災現場にガソリンが供給され続けたことが挙げられている。同製油所では、火

災となった施設とは別に、津波により 2 箇所でタンク付属配管が破損してそれぞれ約 4,400 kℓ、3,900 kℓの重油が流出したが、流出油のほとんどは防油堤内及び周辺の構内道路にとどまった。また、同地区の別の事業所でもタンクの付属配管で 2 箇所のベントノズルが破損し、ガソリン約 1,200 kℓ、重油約 1,400 kℓが防油堤内に流出している<sup>2,3)</sup>。

仙台地区の流出事例では、たまたま流出油のほとんどが防油堤内にとどまったようであるが、大量に堤外に流出することも十分に想定される。ただし、このような津波に伴う流出等の災害の様相や影響を推定することは極めて困難である。津波対策は、予想される浸水深に応じて、重要施設への浸水を如何に防止するか、津波来襲前の緊急遮断などで流出量を如何に少なくするかが基本となり、大量に流出した後の対策はほとんど不可能といえる。

### 8.1.2 地震による流出後の津波

津波が想定される地震により、石油タンクで流出や火災が発生した場合には、その後の津波により陸上あるいは海上で拡大する可能性がある。この場合、前述の短周期地震動及び長周期地震動による被害の評価の結果、大量の流出や火災が想定されるタンクに対して、津波による防油堤内への浸水が懸念されるものについてはさらなる災害拡大が想定されることになる。

また、津波警報が発令された場合には、地震により火災が発生しても警報が解除されるまで消火活動を行うことができず、石油コンビナートへの浸水がなくても火災が拡大していくことも考えられる。特に、大きな津波を引き起こす超巨大地震の場合、遠方においても長周期地震動によるスロッシング被害が懸念されることから、極力火災が発生しないような事前対策が重要になってくる。

## 8.2 高圧ガスタンクの被害

高圧ガス施設が津波の波力、浮力及び漂流物により受ける影響評価については、現在検討が行われているところであり、平成 26 年度までに評価方法の策定が予定されている<sup>4)</sup>。したがって、具体的な評価についてはこの結果を待つことになり、現段階では以下のような被害事例に基づいて災害を想定することになる。

東日本大震災では、津波により高圧ガス設備に次のような被害が発生している（表 8.1）<sup>5)</sup>。

- 高圧ガスの大量漏洩など、想定される被害が極めて大きい貯槽塔の倒壊・転倒は、浸水深 3 m 以上の事業所で発生している。
- 緊急遮断設備、計装設備等の破損・不具合といった、これらの設備が動作しなくなることにより適切な保安措置ができなくなり、大量の高圧ガスが漏洩するなど想定される被害が大きい事象については、浸水深 1 m 未満でも発生している。
- 高圧ガス設備の流出は浸水深 3 m 以上、高圧ガスローリーの流出は浸水深 2 m 以上、高圧ガス容器の流出は浸水深 1 m 以上の事業所で発生している。

また、津波により倒壊・転倒した 5 基の高圧ガスタンク（貯槽）の状況を表 8.2 に示す。津波により流出したのはいずれも小規模のタンクで内容物の漏洩の有無は不明であるが、可燃性ガスが漏洩すれば爆発・火災に至る可能性がある。ただし、液化ガスの場合は大量に漏れたとしても海水からの入熱により短時間で気化し、着火を免れれば大気中に拡散・消滅する。着火・爆発した場合に

は、油や木材などの漂流物に引火して大規模火災の原因になることも考えられる（表 8.1 及び表 8.2 の被害状況は石油コンビナート以外の事業所における被害も含む）。

表 8.1 津波による高圧ガス設備の被害状況<sup>5)</sup>

浸水深	津波の被害を受けた事業所数	津波による被害の状況(複数回答あり)										
		貯槽等の倒壊・転倒	緊急遮断装置の破損・不具合	計装設備、ガス漏洩検知警報設備、防消火設備の破損・不具合	動機器、静機器の損傷・不具合	配管・弁等の変形・破損・不具合	貯蔵等の基礎、脚部等の損傷	容器置場等の倒壊・破損、容器の転倒	事務所等の倒壊・破損	流出の状況		
										高圧ガス設備の流出	高圧ガスローリーの流出	高圧ガス容器の流出
5m以上	20	4	5	11	8	12	12	9	13	7	1	13
		20%	25%	55%	40%	60%	60%	45%	65%	35%	5%	65%
3m以上 5m未満	20	1	12	17	12	17	5	10	13	1	2	9
		5%	60%	85%	60%	85%	25%	50%	65%	5%	10%	45%
2m以上 3m未満	13	0	4	7	6	5	3	3	7	0	5	5
		0%	31%	54%	46%	38%	23%	23%	54%	0%	38%	38%
1m以上 2m未満	16	0	2	6	5	6	1	3	3	0	0	4
		0%	13%	38%	31%	38%	6%	19%	19%	0%	0%	25%
1m未満	4	0	0	2	1	1	0	2	3	0	0	0
		0%	0%	50%	25%	25%	0%	50%	75%	0%	0%	0%
合計	73	5	23	43	32	41	21	27	39	8	8	31

注) パーセンテージは、各津波高さ毎の事業所数における被害の割合

表 8.2 東日本大震災における高圧ガスタンクの倒壊・転倒の状況<sup>5)</sup>

設備	容量	倒壊・転倒の原因(推定)
LPG 貯槽	30 t	流出状況と現場の状況から、浮力、波力の影響大と推定。
LPG 貯槽	20 t	すべての構造物等が流されている状況から、浮力、波力及び漂流物の影響大と推定
液化酸素貯槽	5 t	貯槽の内容物がなかったことと現場の状況から、浮力、波力の影響大と推定。
液化窒素貯槽	3 t	大型漂流物の下敷きになっていることなどから、漂流物の衝突により転倒と推定。
ブタン貯槽	15 m <sup>3</sup>	貯槽に大きな打痕がなかったことから、浮力、波力の影響大と推定。

## 第 8 章 参考文献

- 1) 総務省消防庁：危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書, 2009
- 2) 仙台市消防局警防部危険物保安課：東日本大震災におけるコンビナート地区の被害とその対応,  
Safety & Tomorrow , No.142, 2012
- 3) 消防庁：東日本大震災における危険物施設及び石油コンビナート施設の被害状況調査, 2011
- 4) 経済産業省商務流通保安グループ高圧ガス保安室：経済産業省産業構造審議会保安分科会高圧  
ガス小委員会 第 1 回資料 5 高圧ガス施設等の地震・津波対策の進捗状況について, 2012
- 5) 総合資源エネルギー調査会・高圧ガス及び火薬類保安分科会・高圧ガス部会：東日本大震災を  
踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について, 2012

## 第9章 防災アセスメント結果の活用と公表

石油コンビナート等防災本部（都道府県）は、石油コンビナート等防災計画を作成し、毎年これに検討を加え、必要があると認めるときには修正しなければならないとされている。また、防災計画を策定するにあたっては、特別防災区域で発生する可能性ある災害に関する適切な想定を行うことが不可欠であるため、防災計画に定めるべき事項として「災害の想定に関すること」が規定されている（石災法第31条）。この災害の想定をできるだけ客観的かつ現実的に行うための評価手法を示したのが「石油コンビナートの防災アセスメント指針」である。本章では、この指針に基づいた防災アセスメントの結果をどのように防災計画に活用していくかについて、その基本的な考え方を示す。

### 9.1 アセスメント結果に基づく防災対策の考え方

防災計画を策定（修正）するにあたって、まず防災アセスメントの結果をもとに災害の想定を行い、さらにこれをもとに災害の発生や拡大の防止、周辺地域への影響の低減、周辺住民の安全確保などの対策を検討することになる。防災計画では、対策を災害予防対策、災害応急対策、災害復旧対策の3つに分けて記述することになるが、防災アセスメント結果に関係するのは主に災害予防対策と災害応急対策である。以下に防災アセスメント結果に基づいたこれらの基本的な考え方について述べる。

#### (1) 災害想定

防災アセスメントでは、防災計画上の想定災害と、これに関わる次のような内容を得ることができる。これらは、いずれも防災計画を策定するうえで有用な情報であり、単に想定災害のみを取り上げるのではなく、うまく整理して余すところなく活用していくことが望ましい。

- 災害の種類、形態、拡大規模（空間的、時間的）
- 災害の発生・拡大シナリオ
  - ・ 災害の起因事象（初期事象）
  - ・ 拡大に関与する防災設備、緊急措置（事象分岐）
- 災害の発生危険度
  - ・ 定量的な指標（平常時の発生頻度、短周期地震動による発生確率）
  - ・ 定性的な判断（長周期地震動、大規模災害、津波災害）
- 災害の影響度
  - ・ 影響範囲
  - ・ 関与する物質
  - ・ 影響の形態や程度（物理的な作用強度）

#### (2) 災害予防対策

災害予防計画は、平常時の事故、地震などの自然災害を対象とした石油コンビナート災害の発生、

拡大及び周囲への影響を防止するための事前対策に関する計画で、施設の安全性強化対策、事業所の安全管理体制、防災資機材等の整備、防災教育や防災訓練、影響防止・避難対策などに関する事項が記載される。

### ① 施設の安全性強化対策

想定災害の発生危険度を低減するための物理的な対策であり、災害発生・拡大シナリオで取り上げた初期事象の発生防止と事象分岐の信頼性向上のための対策が考えられる。前者は旧法タンクや準特定タンクの新基準適合の促進、浮き屋根や浮き蓋の耐震基準適合などが、後者は緊急遮断弁の設置、遮断弁も含めた防災設備の停電時の可動性確保などが挙げられる。これらについては、想定災害に至る個々のシナリオを精査して、災害の規模や影響の低減効果を反映した優先度をもとに効率的に実施していく必要がある。特に大規模災害については、本指針に例示した災害拡大シナリオをベースに、発災元となる施設の立地条件、周囲状況などを考慮した詳細な拡大シナリオを作成し、事象分岐となる防災設備・対策をできる限り強化していくことが望ましい。

なお、幸い東日本大震災では発生していないが、潜在的危険性の高い製造プラントでは、大規模地震や津波の発生時に高い頻度で起こり得る停電などのユーティリティ停止が誘因となって、反応暴走などの甚大災害を引き起こす可能性もある。このような危険性やその対策は個々の施設により異なるため本指針で例示した災害発生・拡大シナリオには取り入れていないが、これについては章末の「補足」で述べる。

### ② 事業所の安全管理体制

想定災害の発生危険度を低減するためのソフト対策であり、上記の物理的対策と同様に、災害拡大シナリオをベースに検討することになる。初期事象に関しては、日常的な検査・点検による腐食、ネジやボルトの緩みの発見・補修、入出荷中の監視体制による事故の発生防止などが挙げられる。地震による初期事象の発生確率は、施設が健全であることを前提としており、このような欠陥があると漏洩等の発生確率は推定値よりも大きくなることは言うまでもない。同時に、緊急遮断弁や消火設備等の防災設備を定期的に点検し、災害時に支障なく使用できるようにしておくことも重要である。また、第4章の災害発生・拡大シナリオには明示していないが、早期に緊急遮断などを行い災害の局所化を行うためには、漏洩等の異常を早期に検知・発見するための体制も必要になる。

なお、第7章で述べた宮城沖地震（1978）での重油流出事故は、タンク底部で腐食が進んでいたこと、ガードベースンのゲートがヘドロ堆積のため閉止できなかったことが大量の油が海上に流出した原因とされている。また、東日本大震災でのLPG爆発火災は、ブレース溶接部の脆弱性も原因の一つではあるが、事業所の安全管理体制が大きな原因となって、あのような大規模災害に至り膨大な損失を招いた。安全管理体制の強化は、物理的な強化対策のように多大なコストを要することなく、災害の発生防止、特に大規模災害の被害低減に大きく寄与すると考えられ、極めて重要な対策といえる。

### ③ 防災資器材の整備

石油コンビナート災害に対する消防車両、大容量泡放射システム及び消火薬剤などの防災資器材は、基本的には事業所の自衛防災組織、共同防災組織で保有し、これを補完する形で公設の消防機関が保有することになっている。これらの防災資器材の整備に関しては、事業所、共同防災を形成する区域、あるいは石油コンビナート全域における最大規模の想定災害をもとに進められることになり、そのために必要な火災規模（火災面積）などは防災アセスメントにより概ね把握することが可能である。想定される災害に対して資器材が不足する場合には、必要に応じて増強していくことが望ましいが、資器材を十分に整備することはコスト的に困難な場合が多く、発災時にできるだけ多くの資器材を迅速に集結して被害を低減できるよう、相互の応援体制を強化しておくことが重要になってくる。また、このような資器材整備や応援体制強化とあわせて、消防車両や大容量泡放射システムなど資器材の効率的な運搬、効果的な使用の方法についてもよく検討し、発災時に支障なく運用できるよう定期的に訓練を行っておく必要がある。

### ④ 教育訓練・防災訓練

日常的な施設・設備・機器の運転操作とあわせて、異常時の緊急操作にも十分に習熟して事故の発生を防止を図ることが重要である。近年特に、プラントの異常等に伴い緊急停止したとき、その後の正しい操作やプロセス管理を行えずに容器破裂等の事故に進展するようなケースが問題になっている。これについては、章末の〔補足〕で述べるが、プラントの特性に合わせた詳細な操作マニュアルを作成し、従業員に徹底しておく必要がある。また、災害を想定した防災訓練は、各事業所において定期的の実施されているが、関係機関も含め、本調査検討で取り上げたような大規模災害も想定災害として取り上げて訓練を行っておくことが望ましい。その場合、防災アセスメントで評価した災害拡大シナリオをもとに、災害の空間的、時間的な拡大様相を入れた詳細な訓練シナリオを作成して実施することになる。なお、大規模災害を想定した訓練は、屋外で実際に行うことが困難な場合には、詳細な地図・図面による図上訓練として実施しても十分な効果が期待できる。

### ⑤ 影響防止・避難対策

防災アセスメントにより、一部の大規模災害を除いて、想定災害の影響範囲、関与する物質、影響の形態や程度を把握することができる。災害の影響が事業所外に及ぶ場合には、影響の低減策の検討が必要になってくる。ある程度の規模の災害に対しては、隣接する事業所に影響を及ぼすことは少なからず考えられ、影響が問題になる場合には、塀などの物理的対策と合せて、迅速な情報提供による影響の回避などの対策を事業所間で協議しておく必要がある。影響が石油コンビナート区域外の一般地域に及ぶ場合には、災害の拡大防止とあわせて、緩衝地帯の整備など可能な限りの影響防止対策を検討することになる。しかしながら、東日本大震災で見られたようなLPG タンクの BLEVE（7.2 項参照）に伴う爆発、あるいは毒性物質の漏洩拡散といった大規模災害を前提とした場合、物理的な影響防止対策は困難と考えられ、周辺住民の避難により影響を回避することになる。このような避難対策のあり方については次節 9.2 で述べる。

## ⑥ 津波対策

これまで、石油コンビナート等防災計画の中で、津波を想定した対策は詳しく記載されないことが多かったが、今回の東日本大震災で津波対策の重要性が認識されることとなった。防災アセスメントでは、想定される津波に対する浸水予測図を作成し、これをもとに災害の発生・拡大シナリオを展開して想定される災害を検討し、タンクヤードに浸水するような場合には流出量を推定するなどの被害予測を行うことになる。事業所においては、この浸水予測図をもとに、さらに詳細な被害の様相を検討し、浸水深や津波到達時間に応じた対策を検討しておく必要がある。主な対策としては次のような事項が考えられる。

- 重要設備・機器への浸水防止
- 浮遊流動物対策（主に構内のドラム缶、木材、容器、車両等の浮遊、流出防止）
- 津波到達時間、従業員の避難に要する時間を考慮した緊急措置（マニュアルの整備）

なお、石油コンビナートは高潮対策として設置されている防潮堤よりも海側にある場合が多いことから、従業員の避難にあたっては留意する必要がある。

## (3) 災害応急対策

石油コンビナートで災害が発生したときの行政機関、関係機関、事業所などが実施する応急対策に関する計画で、防災本部の活動体制、情報連絡体制、各種災害に対する防御対策、災害広報、警戒区域、避難、交通規制、応援要請、救急医療などに関する事項が記載される。

災害広報、警戒区域、避難については、災害の形態とその影響範囲や影響程度を把握することが前提となり、防災アセスメントの結果を直接活用することができる。防災本部の活動体制は石油コンビナートで想定される最大規模の災害を前提として整えておく必要がある。また、各種災害に対する防御対策に関しては、防災アセスメントで検討した各種災害の拡大シナリオが役立つであろう。応急対策に関するその他の項目についても、できるかぎり防災アセスメント結果を活用していくことが望ましい。

地震時においては同時多発災害の可能性も考慮しておく必要がある。短周期地震動に関しては、防災アセスメントによって得られる災害発生確率を、施設種類・災害規模（事象）ごとに足し合わせることで、同時に発生する災害件数を大雑把ではあるが把握することができる。想定地震が海溝型の巨大地震の場合には、短周期地震動による被害に加えて長周期地震動による被害も同時に発生する可能性があり、地域によっては地震後の津波によって被害を受けることもある。また、石油コンビナート区域外の市街地等の被害状況によって、石油コンビナート災害に対応できる消防力（公設消防の人員や資器材）は異なってくる。したがって、それぞれの地域において、想定地震の種類や予想される地域全体の被害状況に応じて、石油コンビナート災害に対する応急対策を十分に検討しておく必要がある。

なお、防災アセスメントを実施するには、石油コンビナート内の危険物タンク、高圧ガスタンク、プラント等の施設に関する次のような情報を収集することになる。

- 施設の位置
- 取扱物質の種類、貯蔵・滞留量
- 施設の形状、規模、構造、技術基準



○ 物質の貯蔵・取扱条件（温度、圧力、相など）

○ 防災設備の設置状況（緊急遮断弁、消火設備、除害設備の設置、停電時の可動性など）

実際にはどこでどのような災害が発生するかはわからず、事前の想定災害で必ずしも対応できるとは限らない。したがって、都道府県（石油コンビナート等防災本部）では、防災アセスメントを実施した後もこれらの情報を整理・保存しておき、発災時に事業所から得られる情報とあわせて、リアルタイムに災害の拡大様相や周辺地域への影響の程度を予測し、応急対策や避難対策に役立ていくことが望ましい。

## 9.2 大規模災害を想定した避難計画の考え方

1995 年兵庫県南部地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震では、地震により発生した石油コンビナート災害のため、周辺住民等に対して避難勧告や避難指示が発令された。

石油コンビナートにおいて大規模な災害が発生した場合、発災事業所は直ちに消防機関等へ通報を行うことになるが、関係市町村では災害の状況に応じて避難の可否を判断し、必要な場合には避難勧告または指示の発令、広報等を実施することになる。したがって市町村では、災害発生時に適切な避難誘導が行えるよう、石油コンビナート災害の態様を踏まえた避難計画を策定しておく必要がある。

以下では、市町村における避難計画の策定を前提として、避難の可否の判断基準や避難実施方法の決定にあたっての考え方や留意点を示す。

### (1) 避難計画の策定

避難計画は、概ね以下の事項について記載する必要がある。具体的内容については、石油コンビナート災害の態様を踏まえた検討が必要である。

- ①避難勧告・指示の発令基準
- ②避難勧告・指示の発令者
- ③避難勧告・指示の対象区域及び対象人口
- ④避難場所及び避難経路
- ⑤避難の実施方法

### (2) 石油コンビナートにおける災害事象の特徴

石油コンビナート災害の危険性は取扱う物質の性状や取扱い条件により異なり、適切な避難のためには、災害の態様に応じた避難方法が必要と考えられる。表 9.1 は、石油コンビナートで起こり得る代表的な災害事象の特徴をまとめたものである。

### (3) 避難勧告・指示発令の判断基準

一般的に、避難を要すると考えられるのは、次のような事態が生じた場合である。

- 危険物や可燃性ガスの火災が人体に危険をおよぼすと予想される場合。
- 可燃性ガスの漏洩拡散により、爆発危険が生じた場合。
- 毒性ガスの漏洩拡散により、人体に危険をおよぼすと予想される場合。

○その他最高責任者が必要と認めた場合。

具体的には、表 9.1 の石油コンビナート災害の特徴に基づき、次のように考えられる。

○危険物の液面火災については影響範囲が危険物の流出範囲に限られ、避難が必要となるのは主に火災が延焼拡大した場合であることから、通常の火災と同様に考えることができる。

○可燃性ガスの爆発火災や毒性ガスの拡散については漏洩停止の可否が問題であり、漏洩停止できず長時間にわたってガスが漏洩するような場合には避難が必要となる。

○BLEVE 及びそれに伴うファイヤーボール（7.2 項参照）については、高圧ガスタンク等の周辺で火災が発生し、BLEVE の発生危険性が高まった時には、直ちに避難を要する。

#### (4) 避難対象区域

避難対象区域は、災害が発生した場合の影響範囲の評価結果に基づき設定することになる。

災害の影響範囲はある程度事前に評価しておくと共に、実際の災害発生時に、漏洩の発生状況や気象条件に基づき再評価することが望ましい。

なお、本指針では災害現象の解析手法や影響度評価の基準値を示しているが、適用にあたっては以下の点に留意する必要がある。

○放射熱や爆風圧などが人体に与える影響は、その大きさ（物理的作用の強度）だけでなく、曝露（放射熱や爆風圧などに曝される）時間によっても異なることから、避難に要する時間などを踏まえて、基準値を検討することが望ましい。

○毒性ガスの人体への影響（急性影響）は、物質の種類、曝露量、曝露方法（経口、経皮）の他、対象者（成人、乳幼児、高齢者など）によっても異なることから、毒性ガスの基準値については、医学的見地から妥当性を検討することが望ましい。

○本指針に示されている災害現象の解析モデルは、比較的簡易な手法を一例として示したものである。現在では、より詳細な評価が可能な市販の解析ツールや、ALOHA（2.4 項参照）のように無償で利用可能なツールが開発されていることから、これらのツールの活用も可能である。

#### (5) 避難の実施方法

(3)で示したように、火災の延焼拡大の危険性が生じた場合や、ガスの漏洩停止に失敗した場合、BLEVE の発生危険性が生じた場合には、直ちに避難を要する。

ただし、災害事象によっては避難対象区域が広域にわたることから、災害の発生場所の近隣住民や避難にあたって援助を必要とする住民等を優先的に避難させることも検討しておく必要がある。また、状況に応じて屋内退避を検討することも必要である。

表 9.1 災害事象の特徴

災害事象	影響の評価指標	想定される影響の規模	影響の継続時間	2 次災害の危険性	想定されるシナリオ	避難の可否等
危険物の液面火災(流出火災、タンク火災)	放射熱	放射熱の影響は火災周辺が中心となる。	タンク全面火災の場合には消火活動が困難となり、火災が長時間継続する恐れがある。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・防油堤の損傷等により防油堤外へ火災が拡大する場合や、タンク火災が長時間継続する場合は延焼危険性が高い。</li> <li>・タンク火災では、内容物が原油の場合には、ボイルオーバーの危険性がある。</li> <li>・LPG タンク等が隣接する場合には BLEVE 及びファイヤーボールの危険性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・防油堤外流出火災から周辺への火災拡大</li> <li>・原油タンク火災が長時間継続し、ボイルオーバーにより延焼拡大</li> </ul>	周辺へ延焼拡大の恐れがある場合には避難を要する。
可燃性ガスの爆発火災	拡散ガス濃度(着火・爆発火災の危険性)	可燃性ガスに着火して爆発火災が生じ得る範囲は比較的広範囲となる。特に漏洩の発生地点から風下方向の危険性が高い。可燃性ガスの拡散範囲で着火すると、爆発火災による被害拡大の恐れがある。	ガスの漏洩が停止するまで影響が継続する。	広範囲に拡散した後に着火した場合には大規模な火災となる可能性がある。LPG 等の液化ガスは地面付近を拡散するため注意が必要である。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可燃性ガスが漏洩停止できず広範囲に拡散し、着火して爆発火災となり、延焼拡大</li> </ul>	漏洩停止できず、大規模なガスの拡散が生じた場合には避難を要する。
毒性ガス拡散	拡散ガス濃度	毒性ガスの基準値は非常に小さいため、広範囲に影響が及ぶ。特に漏洩の発生地点から風下方向の危険性が高い。	ガスの漏洩が停止するまで影響が継続する。		<ul style="list-style-type: none"> <li>・毒性ガスが漏洩停止できずに広範囲に拡散</li> </ul>	漏洩停止できず、大規模なガスの拡散が生じた場合には直ちに避難を要する。
BLEVE 及びファイヤーボール	放射熱	BLEVE による爆風圧や飛散物の影響、ファイヤーボールによる放射熱の影響は、非常に広範囲に及ぶ。	ファイヤーボールによる放射熱は数秒～数十秒間継続する。	BLEVE 及びファイヤーボールが生じると、周辺施設への被害拡大の危険性が高い。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・危険物や可燃性ガスの火災により、LPG タンクが長時間火災にあぶられ、BLEVE 及びファイヤーボールを生じる</li> </ul>	BLEVE 発生の可能性がある場合には、直ちに(発生前に)避難を要する。

### 9.3 防災アセスメント結果の公表

この防災アセスメントは、都道府県が防災計画の策定（修正）を行うための基礎調査として実施するものである。調査結果は、一部において利害関係にある事業所と住民に説明し、双方に納得してもらったうえで協力を仰ぎ石油コンビナート及び周辺地域の安全確保に努める必要がある。ここでは、防災アセスメント結果の公表にあたっての留意点をまとめて述べる。

#### (1) 防災アセスメント結果の正しい理解と伝達

本防災アセスメント結果は、起こりうる災害の発生頻度と影響度をあわせたリスクとして捉えることにより意味がある。発生頻度だけ、あるいは影響度だけに注目すると誤解を生じる原因になり、特に影響度だけが注目されて誤解を生じやすい傾向にある。防災アセスメントの実施者（都道府県）は、このような防災アセスメント結果の意味を正しく理解し、住民や事業所に対して正しく説明しなければならない。特に影響力が大きいマスコミに伝えるときには、影響度だけを強調して報道されないような配慮が必要である。

#### (2) 公表に伴う問題点の整理と解決

防災アセスメント結果の公表を難しいものにする要因として次の事項が挙げられる。これらに関して、社会的及び学術的に認知されかつ説得力のある説明を行わなければならない。

##### ① 絶対安全を要求する社会

わが国では絶対安全が要求されることがしばしばある。このような状況に直面した場合には、時間を掛けてでもリスクの基本概念をわかりやすく説明し、日常生活において絶対安全は理想であるが達成困難であること、国民はすべて石油産業により直接的あるいは間接的に便益を受けていること、そのためにはある程度のリスクは許容しなければならないこと（安全とはリスクがない状態ではなくリスクが小さい状態であること）、この防災アセスメントは許容できないようなリスクを明確にし行政としての対応策を検討するためのものであることなどを理解してもらう。ただし、行政が許容できるとしても、住民は許容できないと受け取ることもあり、許容水準については十分にコミュニケーションを図る必要がある。

##### ② リスクの不公平さ

石油コンビナートが存在することによるリスクは石油コンビナート周辺の住民が背負うことになり、これらの人々が他の地域に住む人々に比べて特に便益を受けているということはない。現実社会に存在するリスクがすべての住民に対して公平であることはほとんどないが、一般に不公平なリスクは公平なリスクに比べて受け入れられにくい傾向にある。したがって、石油コンビナート周辺の住民に対しては、リスクを明示するとともに行政としての具体的な対応策を示すことによりできるだけ不安の解消に努める必要がある。

### ③ 防災アセスメント結果の不確実性

現状においては、データ入手など種々の制約により防災アセスメント結果はかなりの不確実性を伴う。しかしながら、石油コンビナート及び周辺地域の相対的な危険性を把握し、防災対策の必要性や優先度を決定するといった目的に対しては有効な評価であることを説明し納得してもらう。

また、不確実なところは安全サイドの（災害が起こりやすい、あるいは影響が大きめになるような）評価を行わざるを得ない。これは事業所にとっては不利な評価となり、結果によっては反発を受けることも考えられる。したがって、冒頭にも述べたように、本防災アセスメントは主として行政サイドのソフト対策（事業所の協力は必要であるが）を検討することを目的とした基礎的（一次的）な評価であり、この結果により直ちに事業所に多大なコストを要するハード対策を要求するものではないことを説明し、理解してもらう必要がある。

### (3) リスクの比較

石油コンビナート災害によるリスクが許容できるかどうかを議論するとき、他の原因によるリスクと比較することがよく行われ、これが唯一のよりどころとなることが多い。このとき次のような点に注意すべきである。

- 人為的な事故災害によるリスクは、地震や水害など自然災害によるリスクと同程度か小さくても受け入れられないことが多い。
- 喫煙、車の運転、スポーツなどライフスタイルの選択による自発的なリスクと、石油コンビナート災害のような強制されたリスクを比較することは好ましくない。
- 防災アセスメントにより得られたリスクと統計データに基づいて算出したリスクを比較するときは、精度の違いを考慮する必要がある。

## 補足 緊急停止に係る安全上の留意事項

### (1) 地震発生時における設備の緊急停止

東日本大震災では、調査対象事業所の約7割がすべてまたは一部の設備を緊急停止している。緊急停止した事業所の多くはすべての設備が正常に停止したが、一部の事業所では危険物や高圧ガスタンクにおいて、停電による受払配管電動弁の閉止失敗や、設備損傷による空気弁の閉止失敗が生じている<sup>1)</sup>。

タンク受払配管の緊急遮断は、万一漏洩が発生した場合の災害拡大防止のために重要な措置となる。緊急遮断の成否は、設置されている弁の種類（電動弁、空気弁等）や、予備動力源の有無によって異なる。空気弁の場合には、停電しても予備電源（バッテリー）による開閉操作が可能であるが、電動弁の場合には停電時の予備動力源がなければ遠隔操作による緊急遮断は行えず、手動により閉止することとなる。東日本大震災では、調査対象事業所の半数近くの事業所において電力会社からの送電が停止していることから、停電時の緊急遮断の可否について、改めて検討する必要があると考えられる。

また、高温高圧の運転条件や、重合などの連鎖反応を扱う製造プラントにおいては、緊急停止操作を安全に完了するために、電力、保安用の窒素、冷却水や加温用の蒸気といったユーティリティ（用役）の確保が極めて重要になる。幸い東日本大震災では事故に至った例はないが、停電が長時間継続するなどにより、必要なユーティリティが確保できない場合には、反応暴走などの2次被害を引き起こす可能性がある。このような危険性は個々の設備により異なるが、災害発生の可能性のある設備については、電力復旧までの時間を踏まえ、必要な対策を検討する必要がある。

### (2) 津波発生時における設備の緊急停止

東日本大震災では、地震発生後の緊急停止操作中に、津波により人的被害（4名）が発生している。これは、非常用バッテリーの容量不足により放送設備が使用できず、栈橋でタンカー離散作業を行っていた作業員へ引上げ指示（大津波警報を受けたもの）の伝達が遅れたことによる。

このような、津波警報発令下における緊急時の対応についての危険性を踏まえて消防法令の改正が行われ、津波による浸水の可能性がある施設については、津波の到達時間を考慮した緊急停止措置や従業員の安全確保等について、予防規程に追加することが定められた（平成24年8月21日、消防危第197号）。

津波の発生時には、設備の緊急停止操作と従業員の安全確保の両立は困難な場合も想定されるが、従業員の安全確保を最優先として、可能な範囲で緊急措置を行うこととなる。その際に重要となるのが津波情報の収集であり、より迅速かつ確実な情報収集・伝達のための方策検討が必要と考えられる。

### (3) 通常操業時における設備の緊急停止

地震によるものではないが、近年以下に示すような、緊急停止操作中の不備による製造プラントの爆発火災事故が発生している。特に反応性の高い不安定物質を扱う設備や、重合反応など反応暴

走の可能性がある設備については、本来災害拡大を防止するための措置である緊急停止が、災害拡大の要因にならないよう注意すべきである。

○2011 年 11 月（山口県）

製造プラントにおいて、反応工程の緊急放出弁の誤作動によりインターロックが作動し、プラント全体的大幅な緊急ロードダウンが発生したが、その際の温度管理が適切ではなかったこと、反応工程の危険性に関する知識が十分でなかったことなど、いくつかの要因により徐々に異常反応が進行し、反応塔の温度・圧力が急上昇して破裂に至ったものである。この事故により、発災事業所の従業員 1 名が死亡し、発災プラントを中心に周辺プラントの一部に爆風及び飛散物による甚大な損壊が発生した<sup>2)</sup>。

○2012 年 4 月（山口県）

製造プラントにおいて、用役トラブルにより作動したインターロックを解除したことにより酸化反応器へ供給されていた窒素が停止し、液相の攪拌が停止した。その結果、冷却コイルのない液相上部の温度が上昇し、破裂、爆発、火災に至ったものである。この事故により、発災事業所の従業員 1 名が死亡、2 名が重傷、周辺住民を含む 23 名の軽傷者を生じた。また、爆風圧や飛散物により事業所内外に大きな被害をもたらした<sup>3)</sup>。

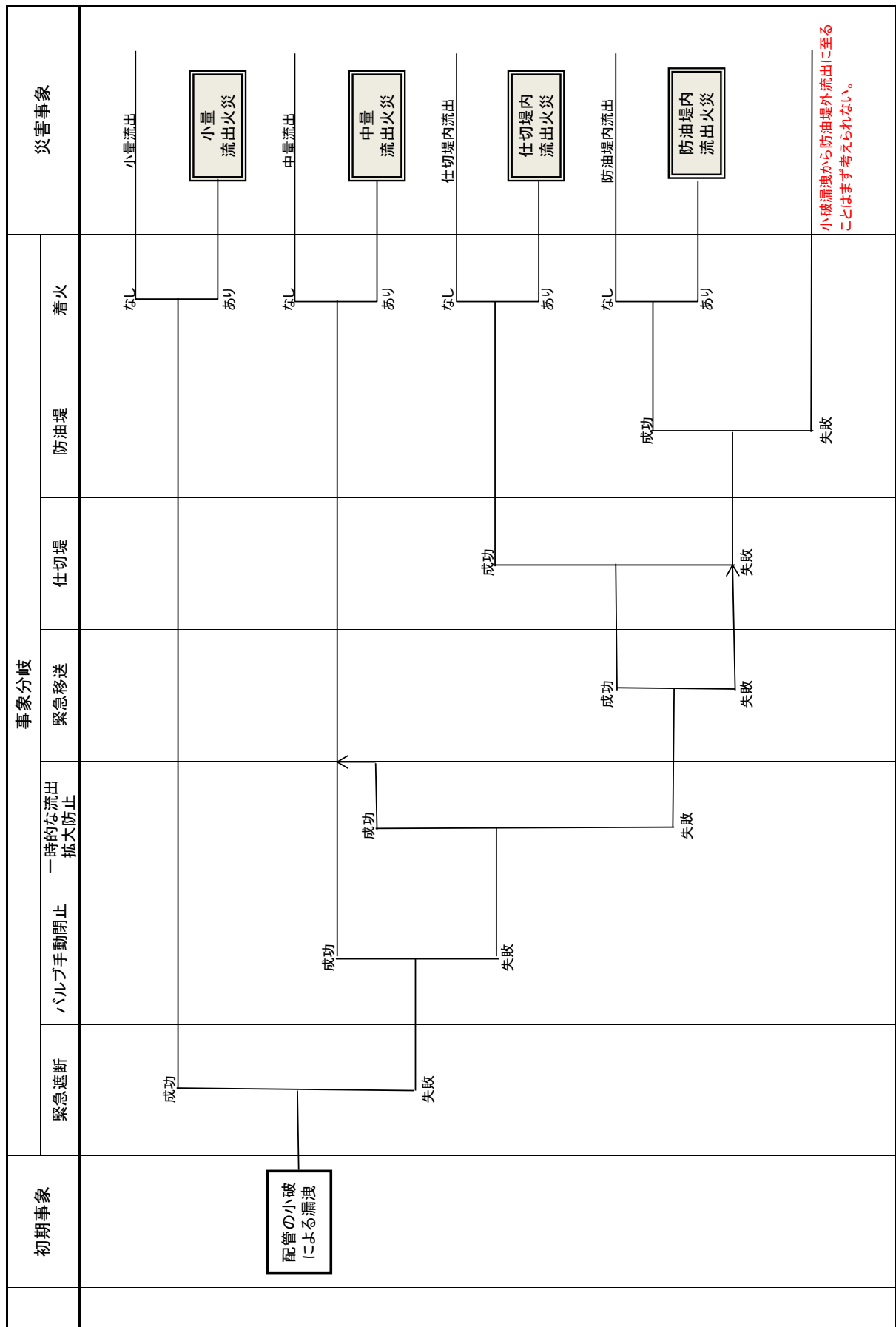
## 第 9 章 参考文献

- 1) 消防庁危険物保安室・特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書, 2011
- 2) 東ソー(株)南陽事業所 第二塩化ビニルモノマー製造施設爆発火災事故調査対策委員会：南陽事業所 第二塩化ビニルモノマー製造施設爆発火災事故調査対策委員会 報告書, 2012
- 3) 三井化学(株)岩国大竹工場：レゾルシン製造施設爆発・火災にかかわる報告書, 2012



## 参考資料 1 災害の発生・拡大シナリオの一例

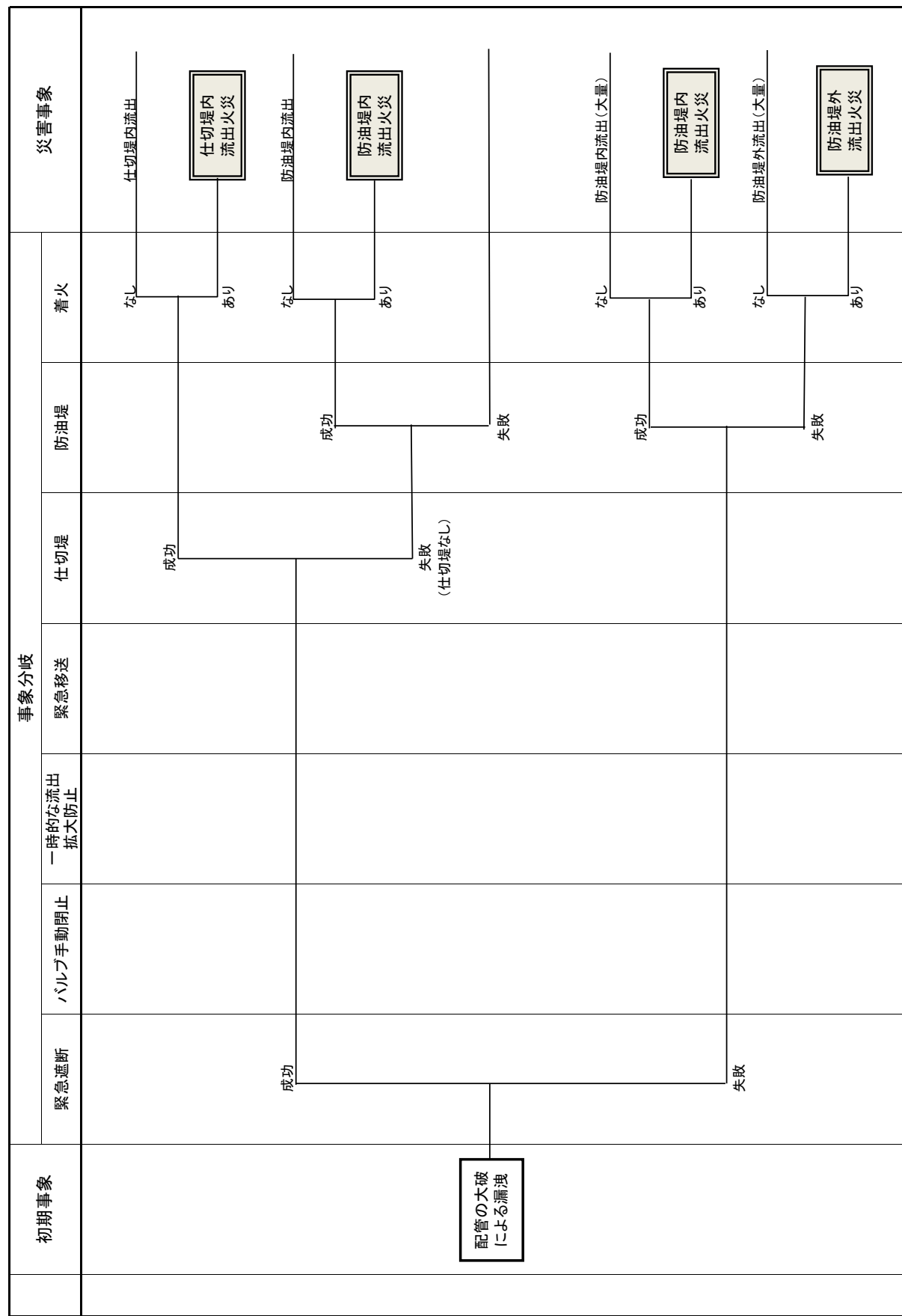
ET図1ー1 配管の小破による漏洩(平常時及び短周期地震動・危険物タンク)



ET図1ー2 タンク本体の小破による漏洩（平常時及び短周期地震動・危険物タンク）

初期事象	事象分岐							災害事象
	緊急遮断	バルブ手動閉止	一時的な流出 拡大防止	緊急移送	仕切堤	防油堤	着火	
<div>本体の小破 による漏洩</div>			<div>成功</div>		<div>成功</div>		なし	中量流出
							あり	<div>中量 流出火災</div>
							なし	仕切堤内流出
							あり	<div>仕切堤内 流出火災</div>
				<div>成功</div>	<div>成功</div>	<div>成功</div>	なし	防油堤内流出
							あり	<div>防油堤内 流出火災</div>
			<div>失敗</div>	<div>失敗</div>	<div>失敗</div>	<div>失敗</div>		<div>小破漏洩から防油堤外流出に至る ことはまず考えられない。</div>

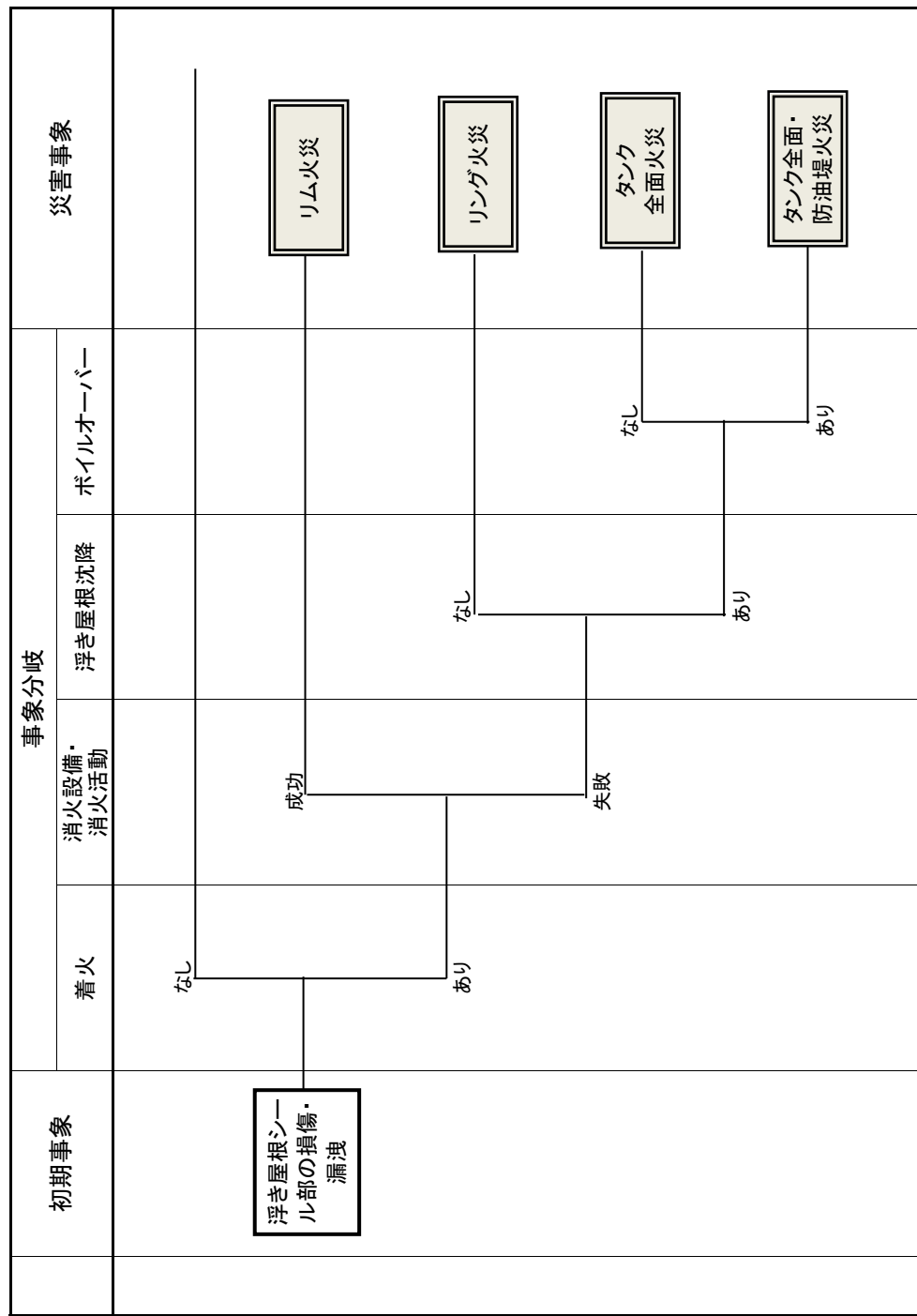
ET図1ー3 配管の大破による漏洩(平常時及び短周期地震動・危険物タンク)



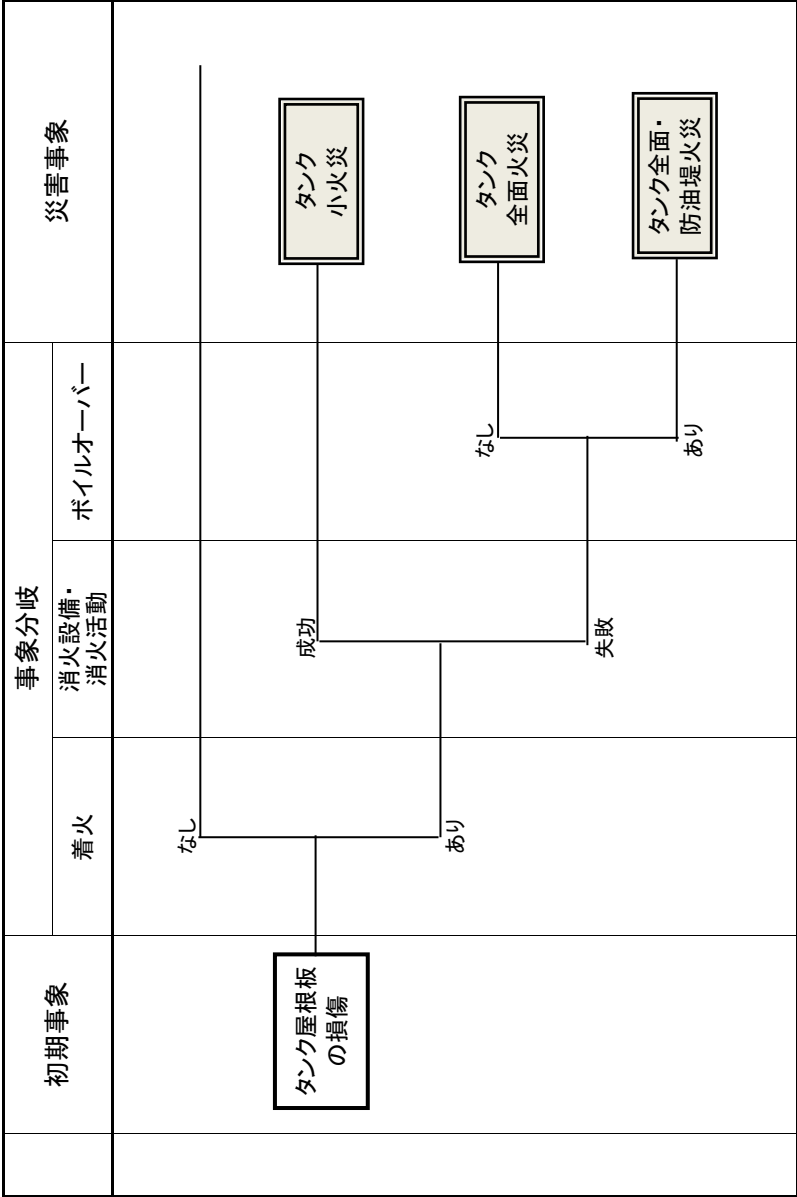
ET図1ー4 タンク本体の大破による漏洩(平常時及び短周期地震動・危険物タンク)

	初期事象	事象分岐							災害事象
		緊急遮断	バルブ手動閉止	一時的な流出 拡大防止	緊急移送	仕切堤	防油堤	着火	
	<div>本体の大破 による漏洩</div>						成功	なし	防油堤内流出(大量)
								あり	<div>防油堤内 流出火災</div>
							失敗	なし	防油堤外流出(大量)
								あり	<div>防油堤外 流出火災</div>

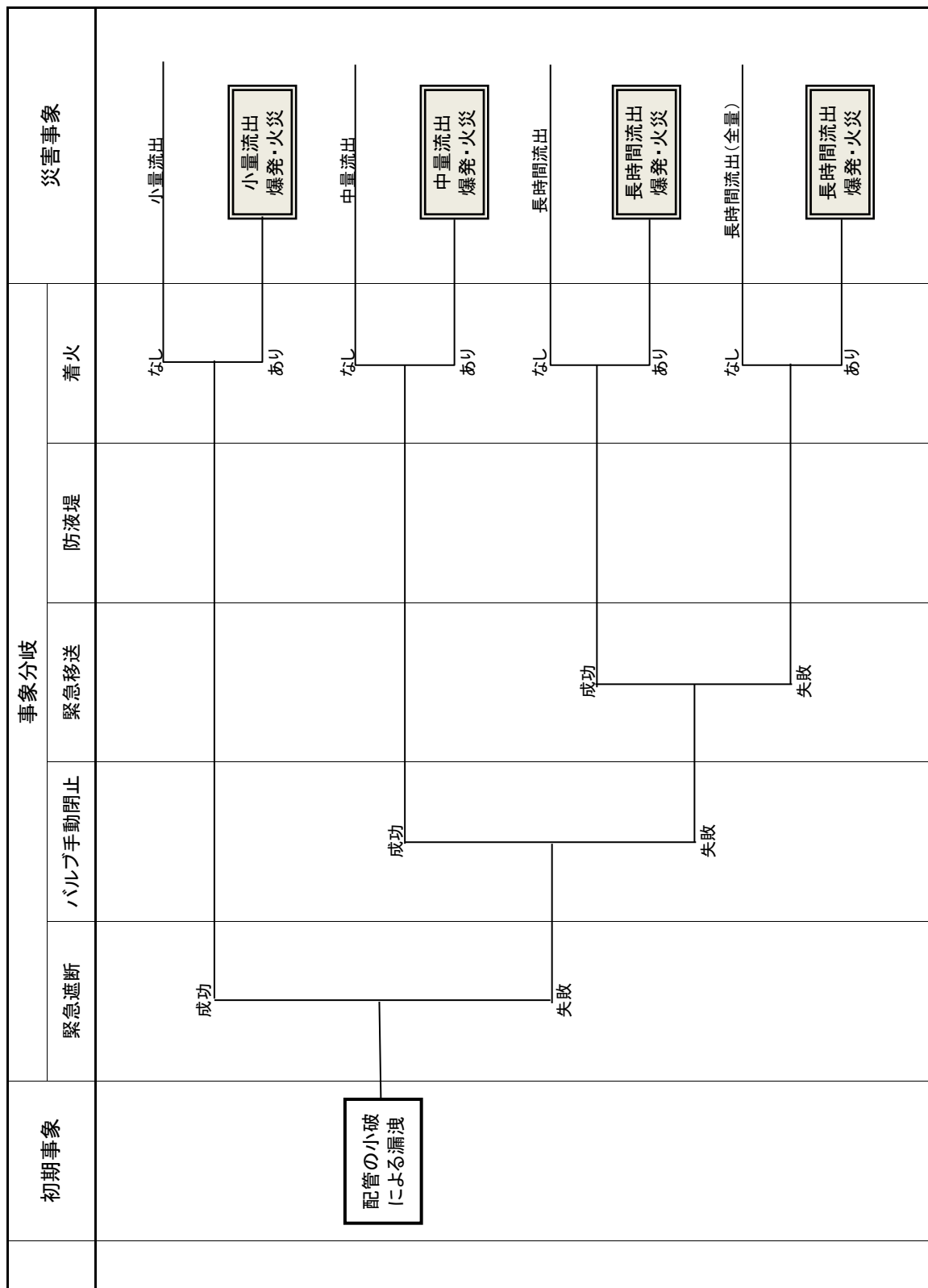
ET図1ー5 浮き屋根シール部の損傷・漏洩(平常時・浮き屋根式危険物タンク)



ET図1ー6 タンク屋根板の損傷(平時・固定屋根式危険物タンク)



ET図2ー1 配管の小破による漏洩(平常時及び短周期地震動・可燃性ガスタンク)

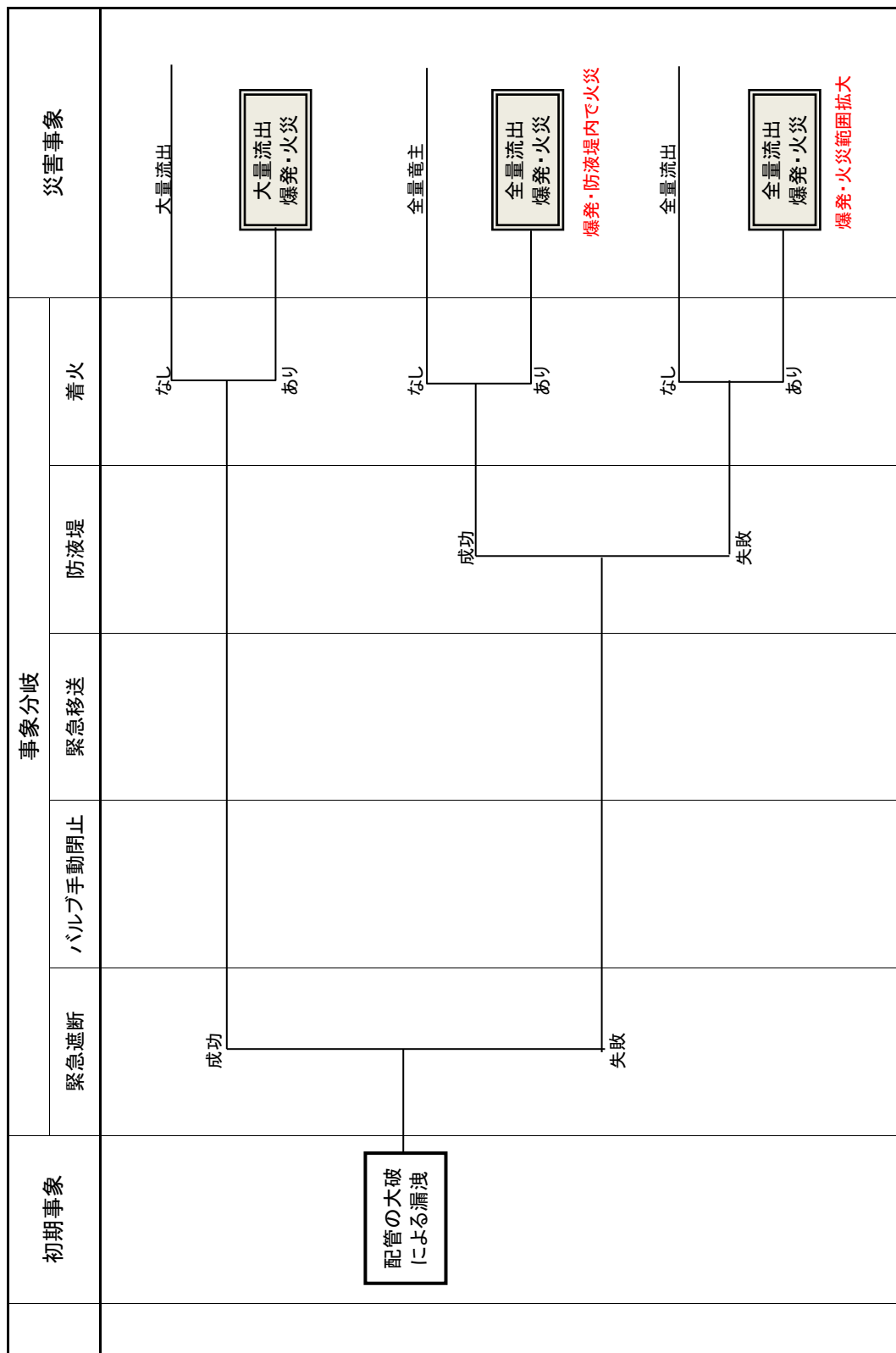




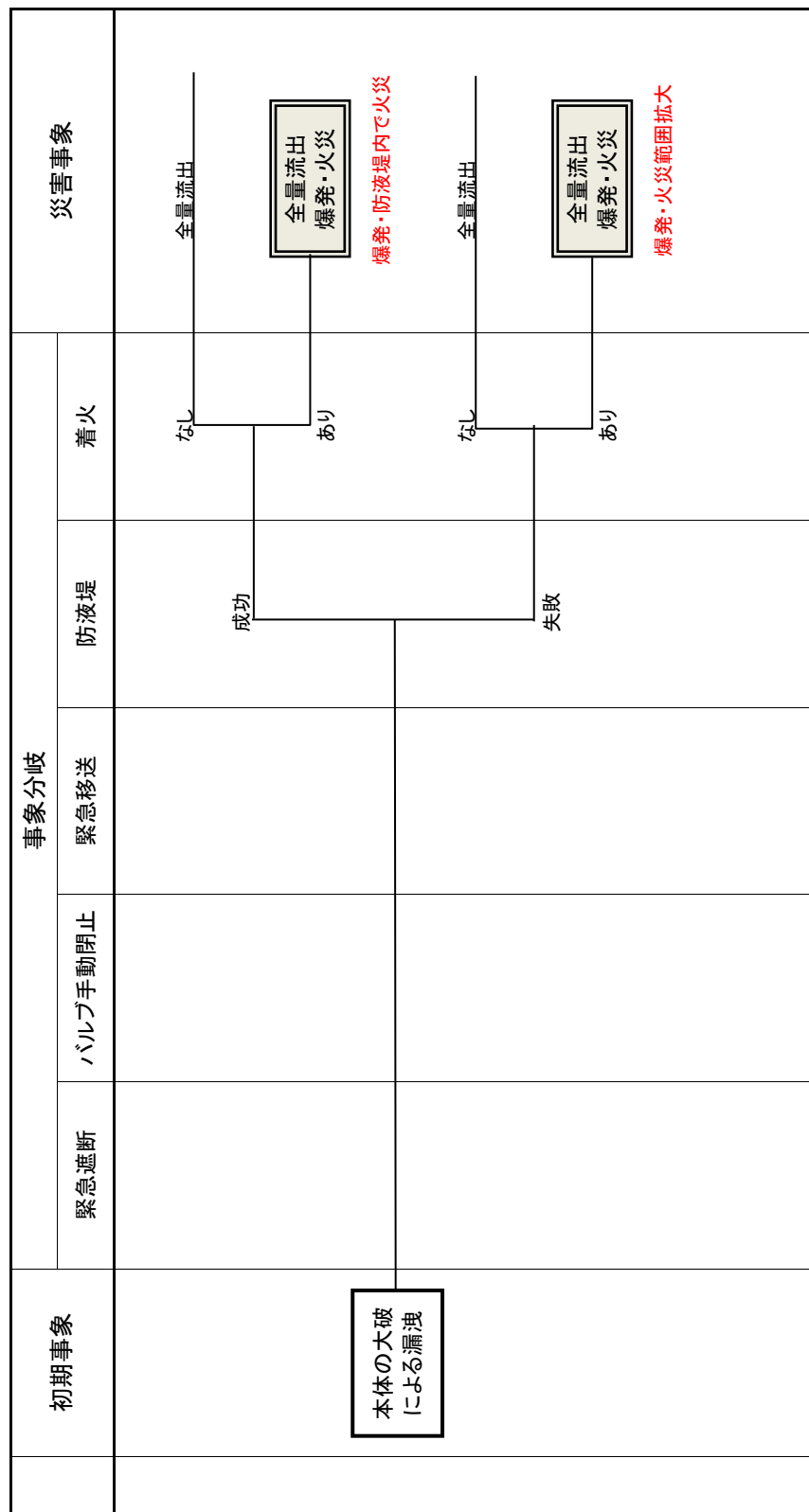
ET図2-2 タンク本体の小破による漏洩（平常時及び短周期地震動・可燃性ガスタンク）

初期事象	事象分岐					災害事象
	緊急遮断	バルブ手動閉止	緊急移送	防液堤	着火	
本体の小破による漏洩			成功		なし	長時間流出
					あり	長時間流出 爆発・火災
			失敗		なし	長時間流出(全量)
					あり	長時間流出 爆発・火災

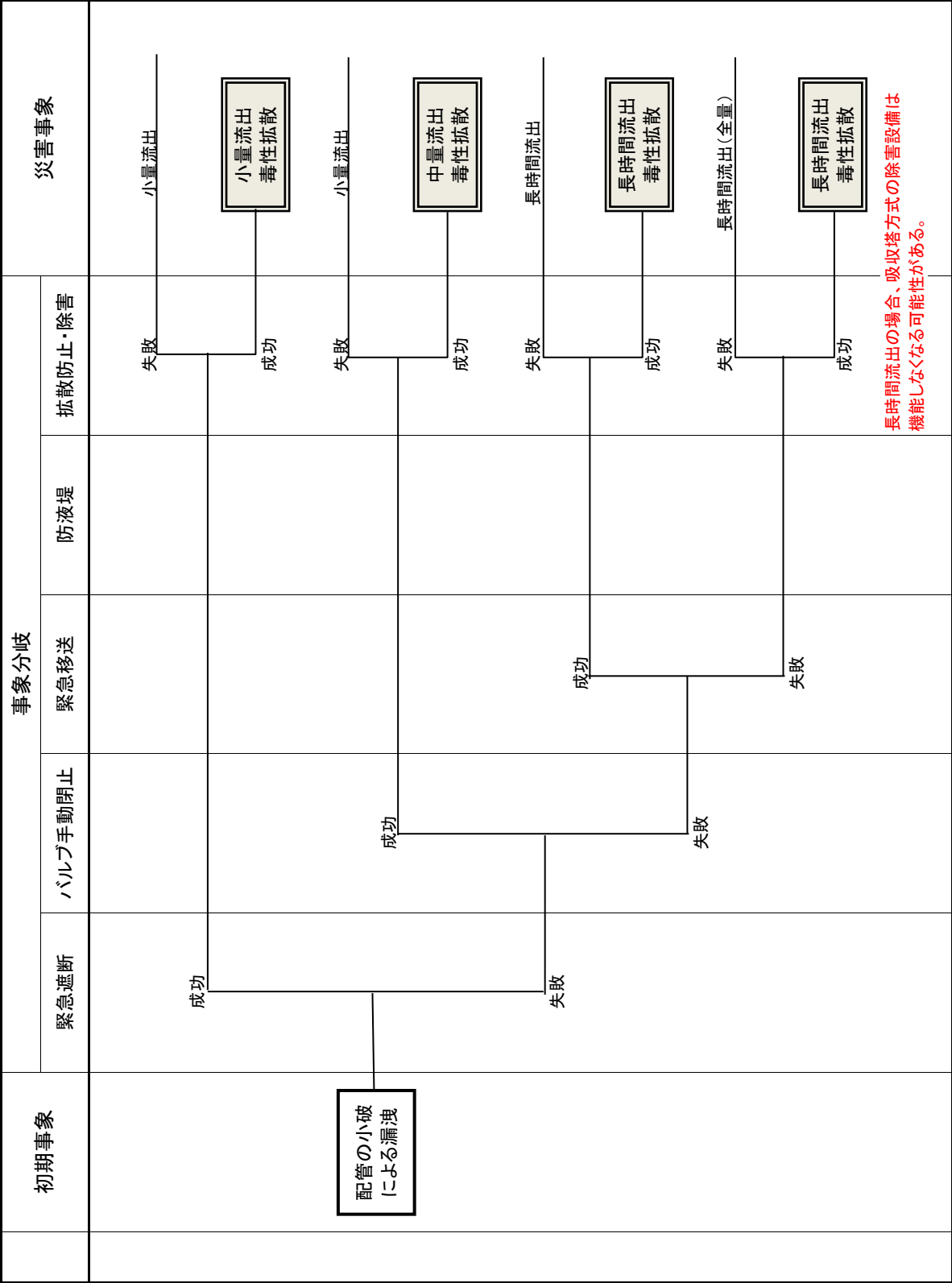
ET図2-3 配管の大破による漏洩(平常時及び短周期地震動・可燃性ガスタンク)



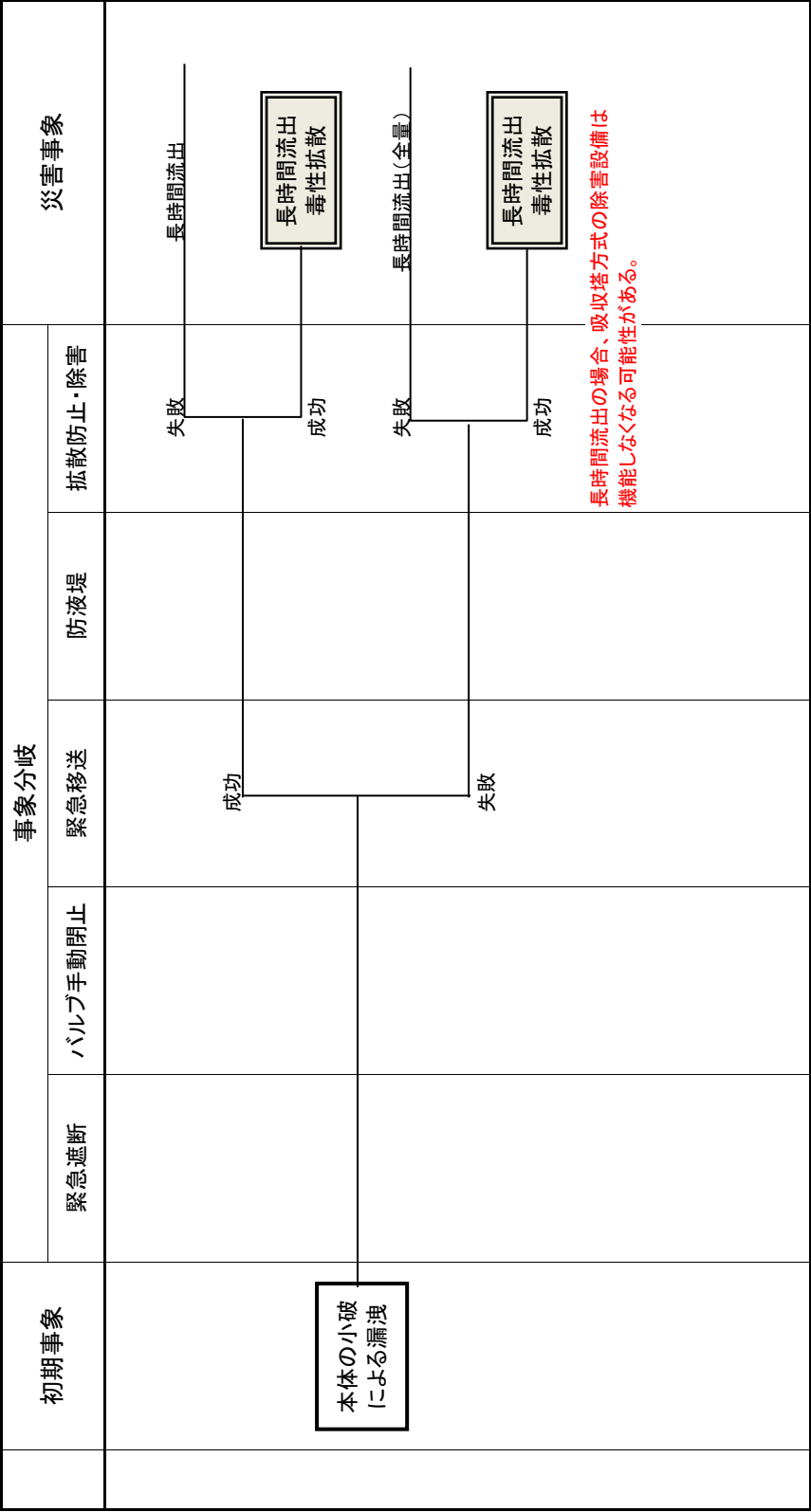
ET図2-4 タンク本体の大破による漏洩（平常時及び短周期地震動・可燃性ガスタンク）



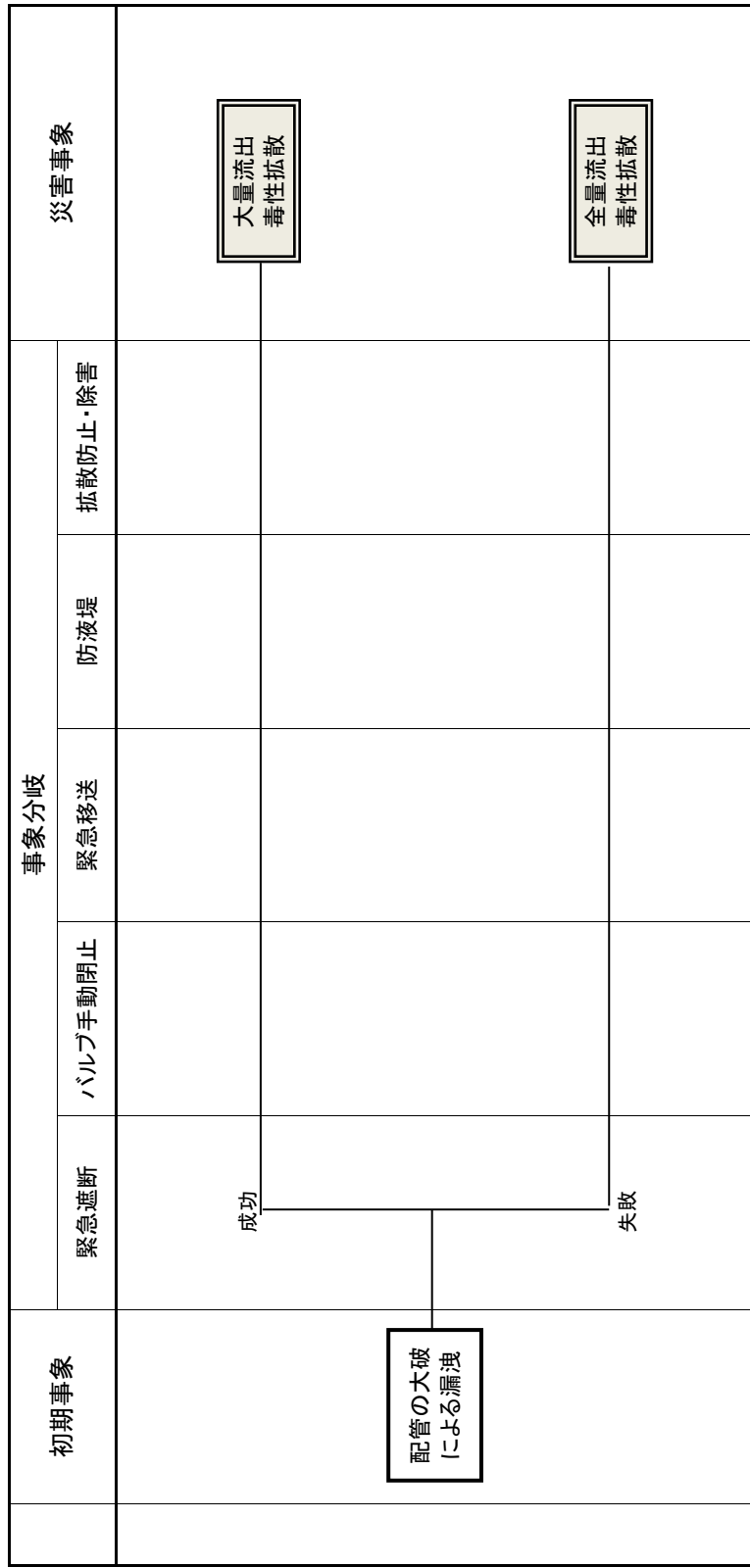
ET図2-5 配管の小破による漏洩(平常時及び短周期地震動・毒性ガスタンク)



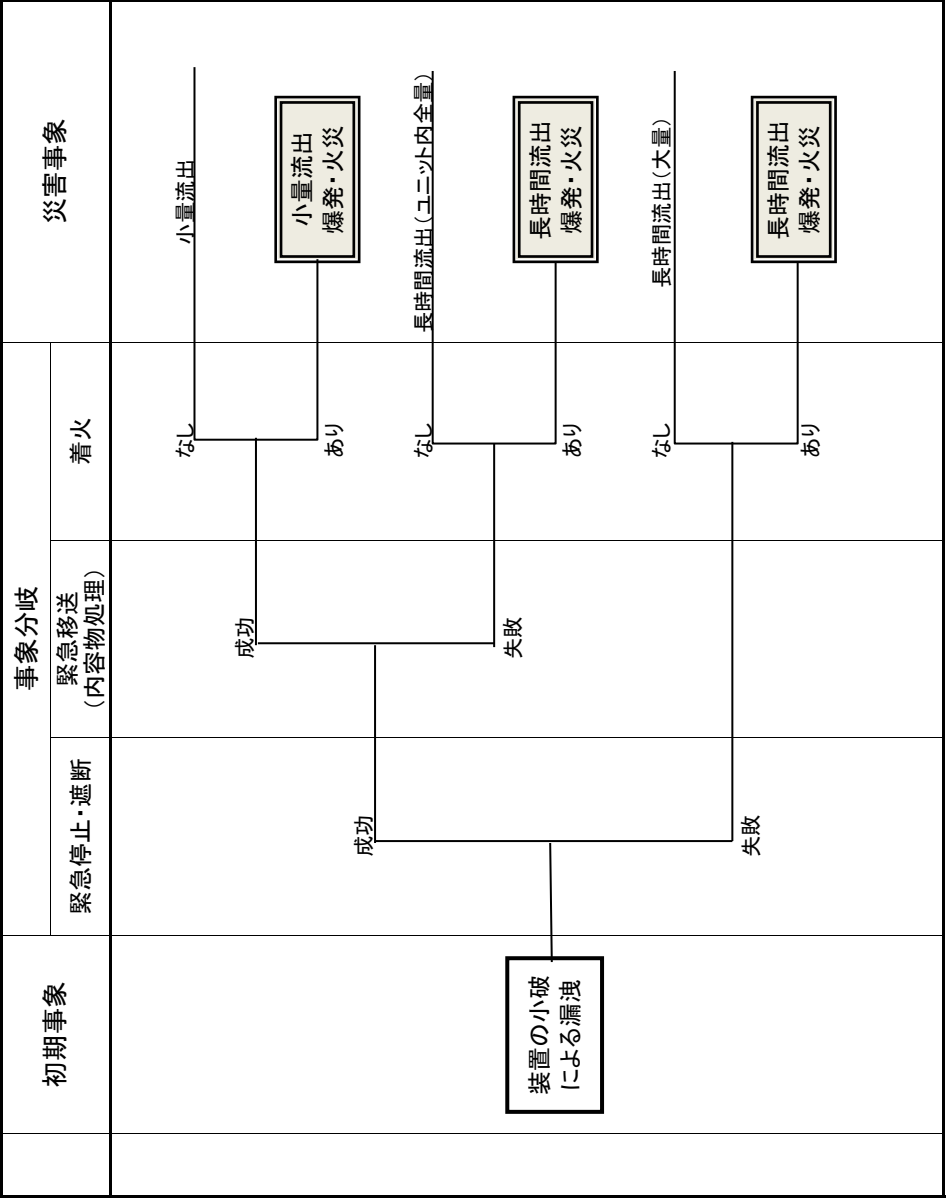
ET図2-6 タンク本体の小破による漏洩(平常時及び短周期地震動・毒性ガスタンク)



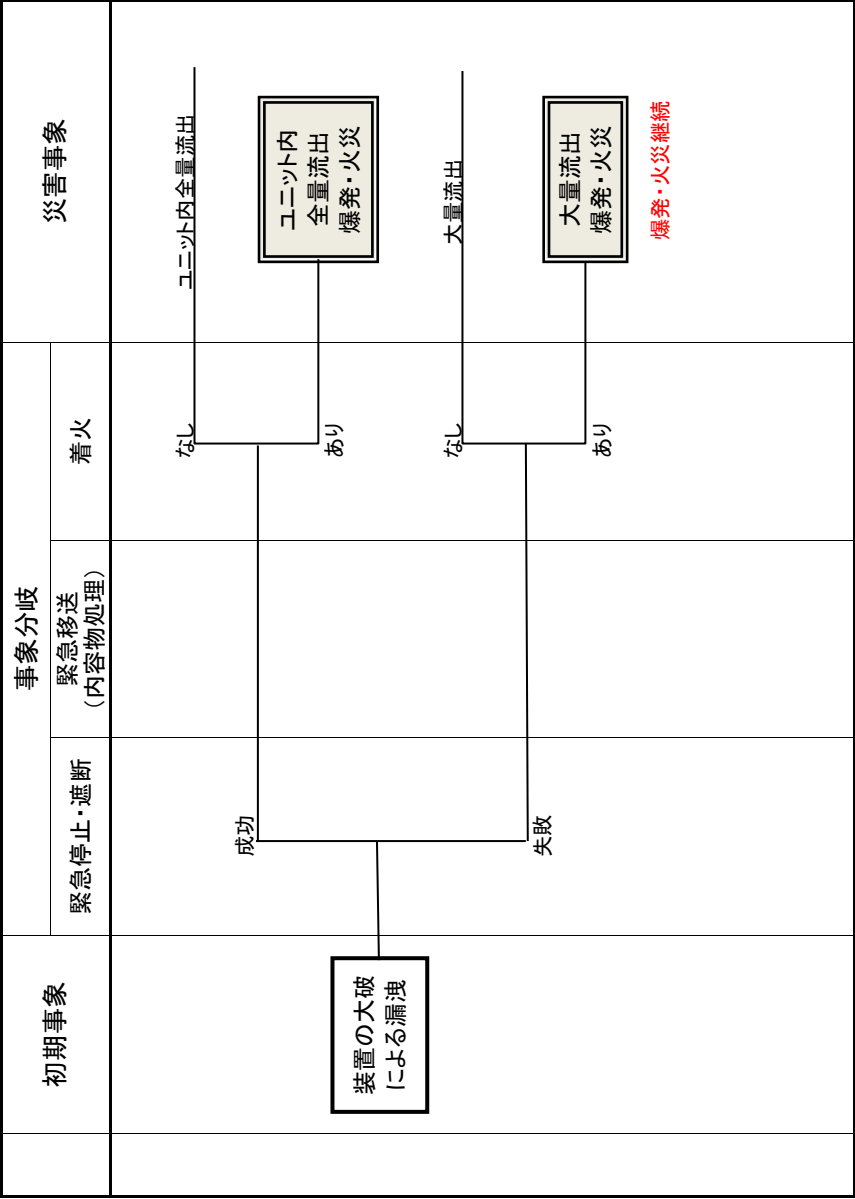
ET図2ー7 配管の大破による漏洩(平常時及び短周期地震動・毒性ガスタンク)



ET図3ー1 装置の小破による漏洩（平常時及び短周期地震動・製造設備）

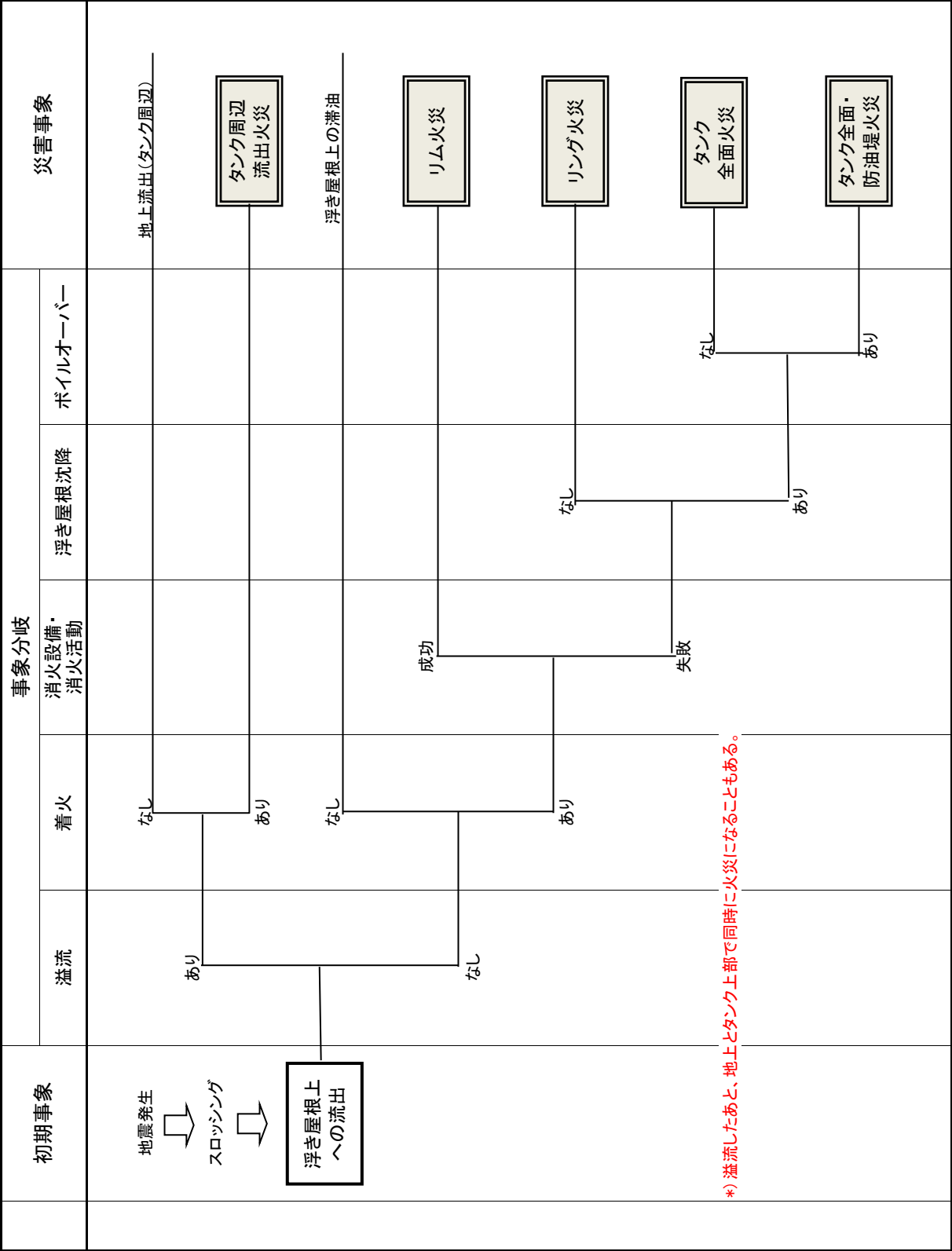


ET図3ー2 装置の大破による漏洩（平常時及び短周期地震動・製造設備）

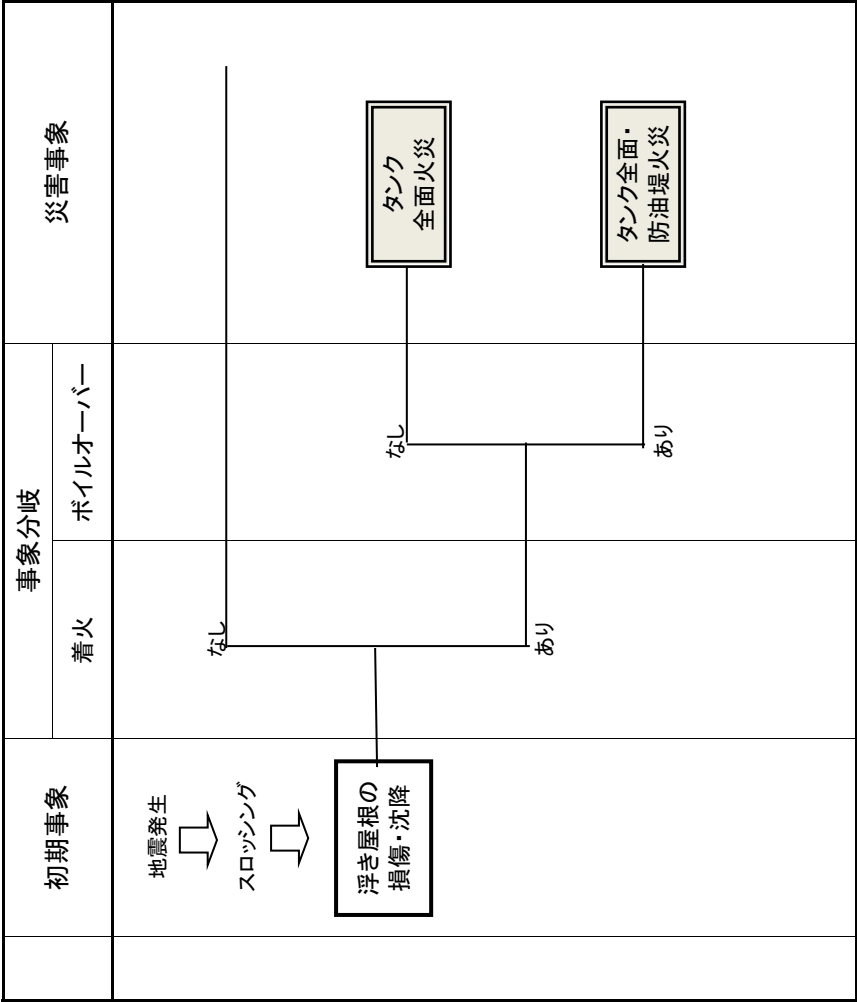




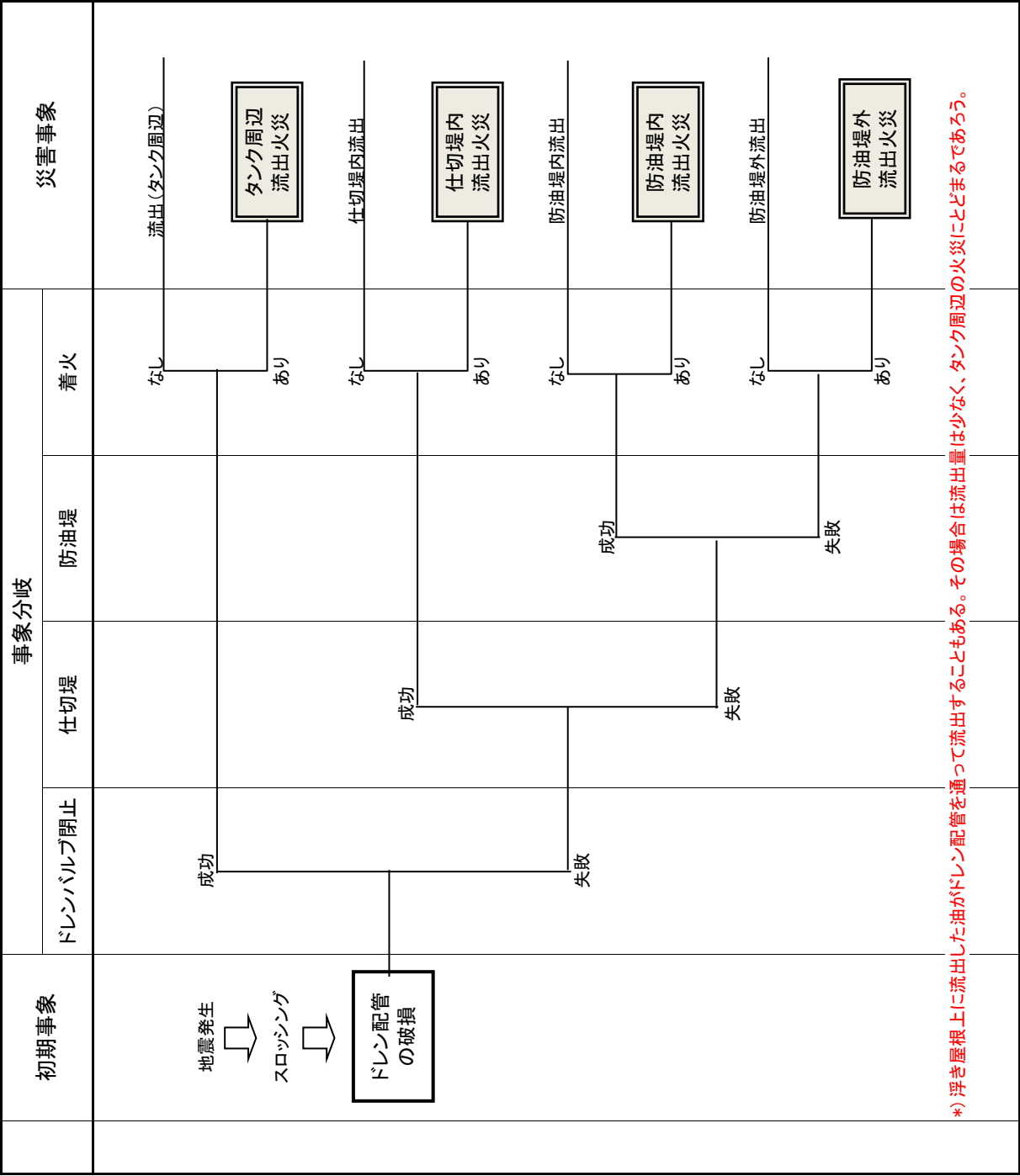
ET図4-1 浮き屋根上への流出(長周期地震動・浮き屋根式危険物タンク)



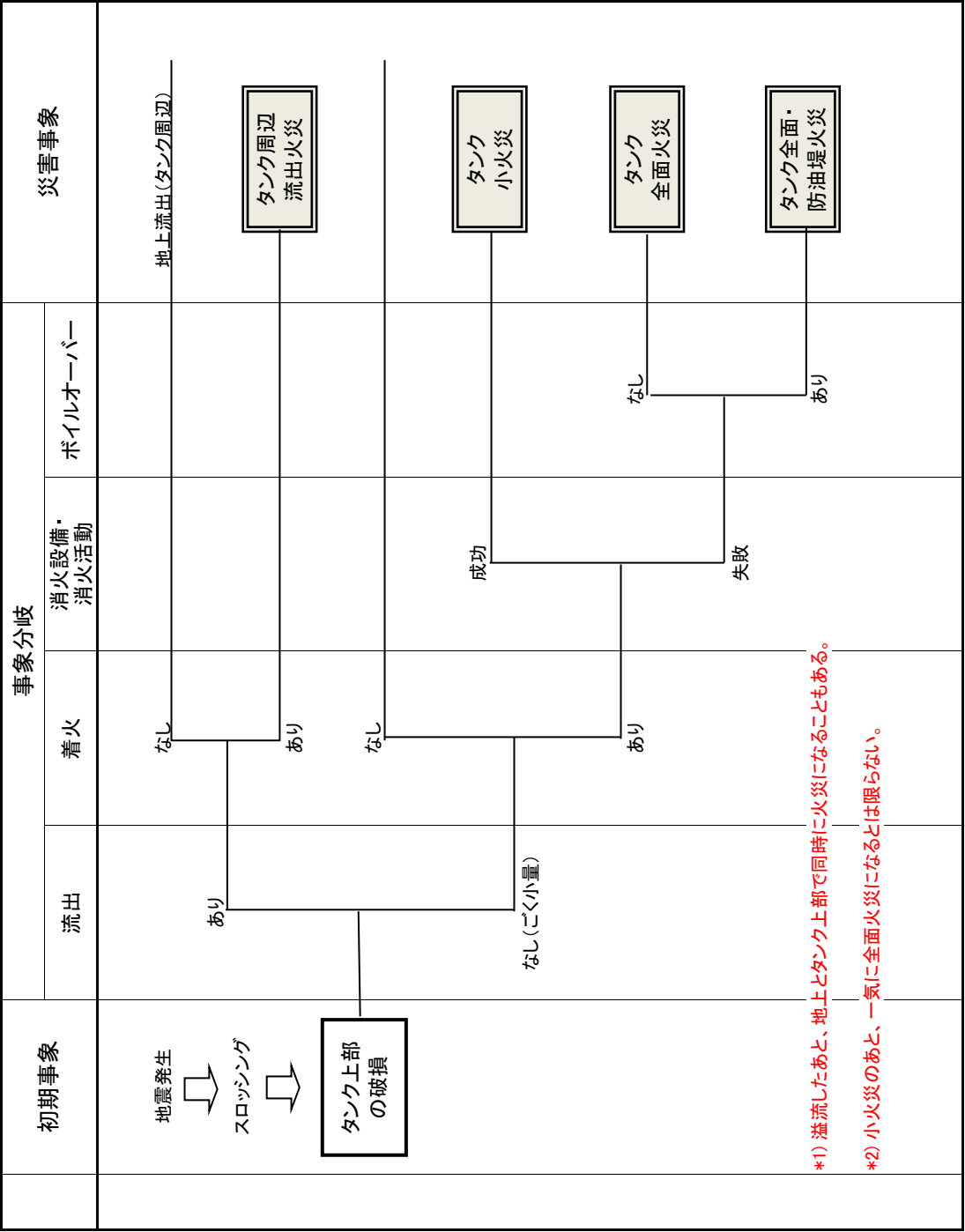
ET図4-2 浮き屋根の損傷・沈降(長周期地震動・浮き屋根式危険物タンク)



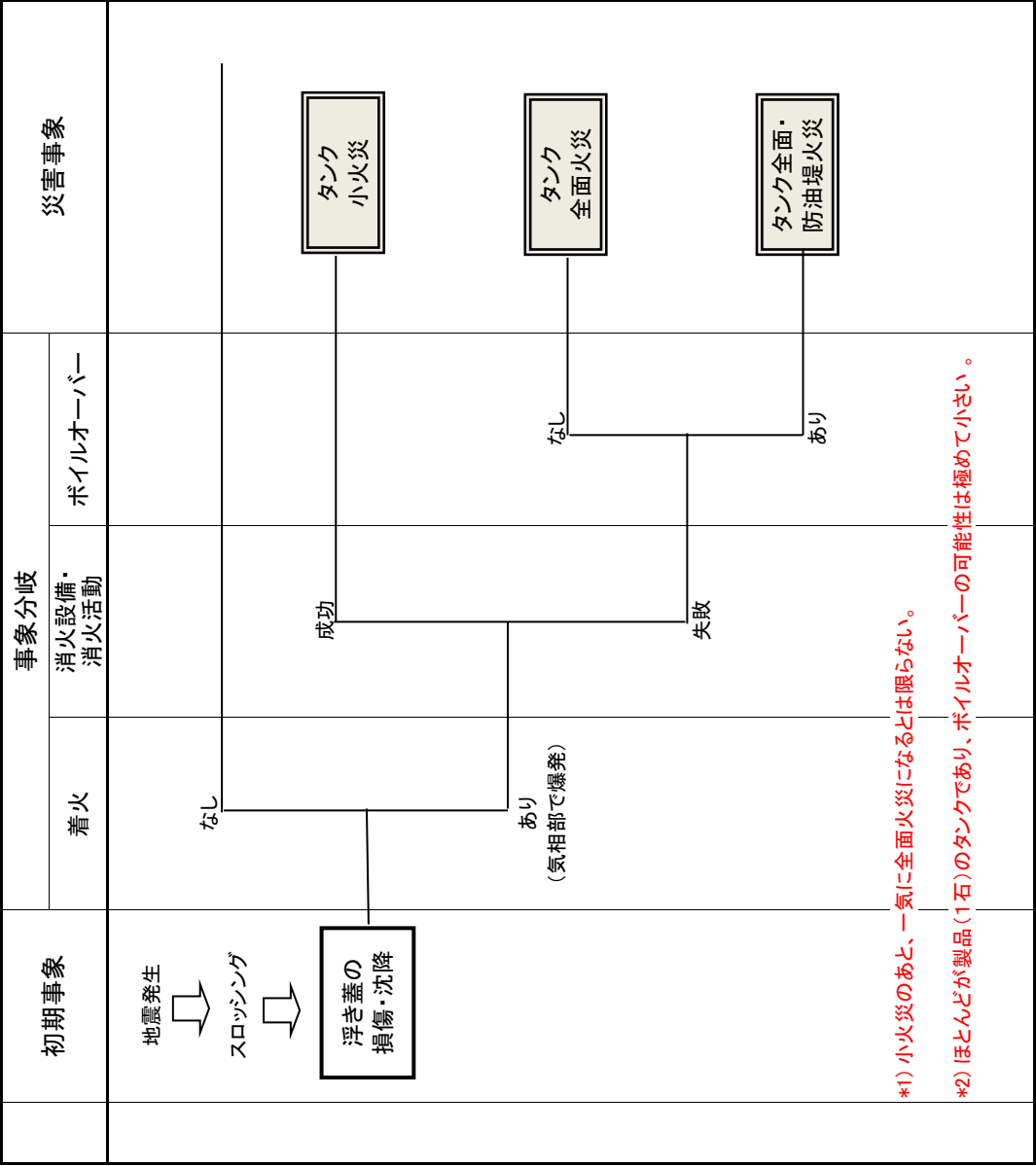
ET図4ー3 タンク中のドレン配管の破損(長周期地震動・浮き屋根式危険物タンク)



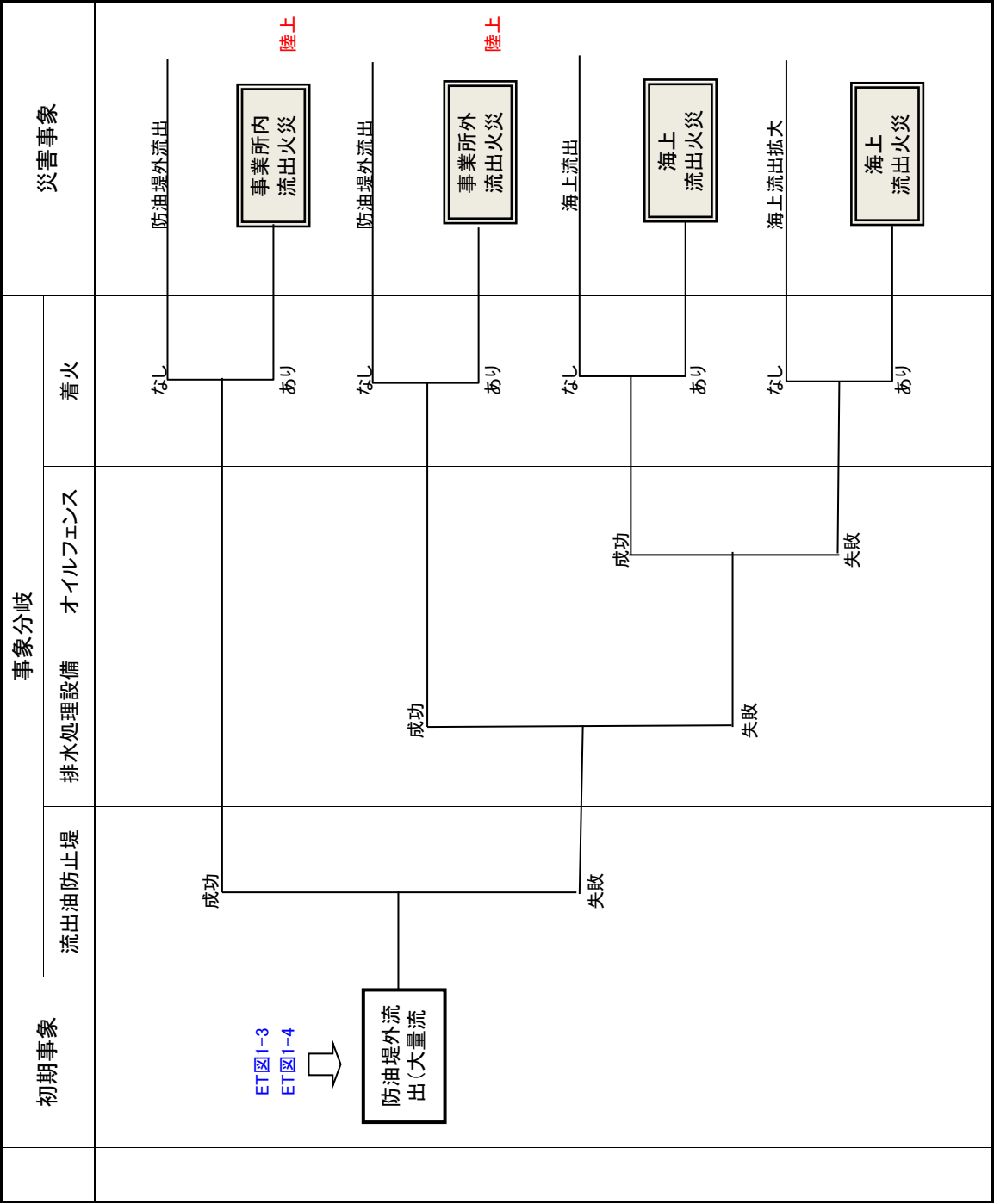
ET図4-4 タンク上部の破損(長周期地震動・固定屋根式危険物タンク)



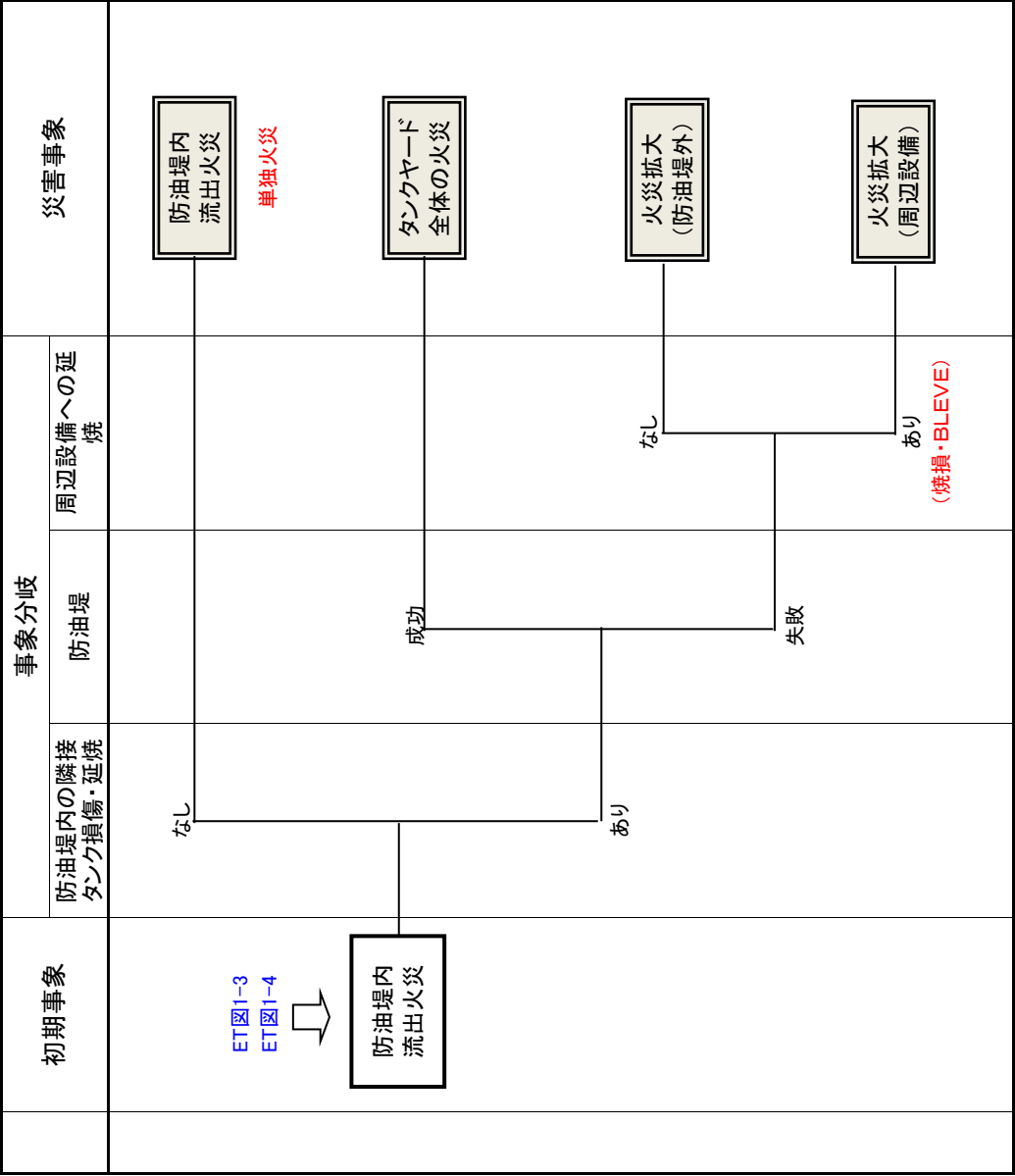
ET図4ー5 浮き蓋の損傷・沈降(長周期地震動・内部浮き蓋付き危険物タンク)



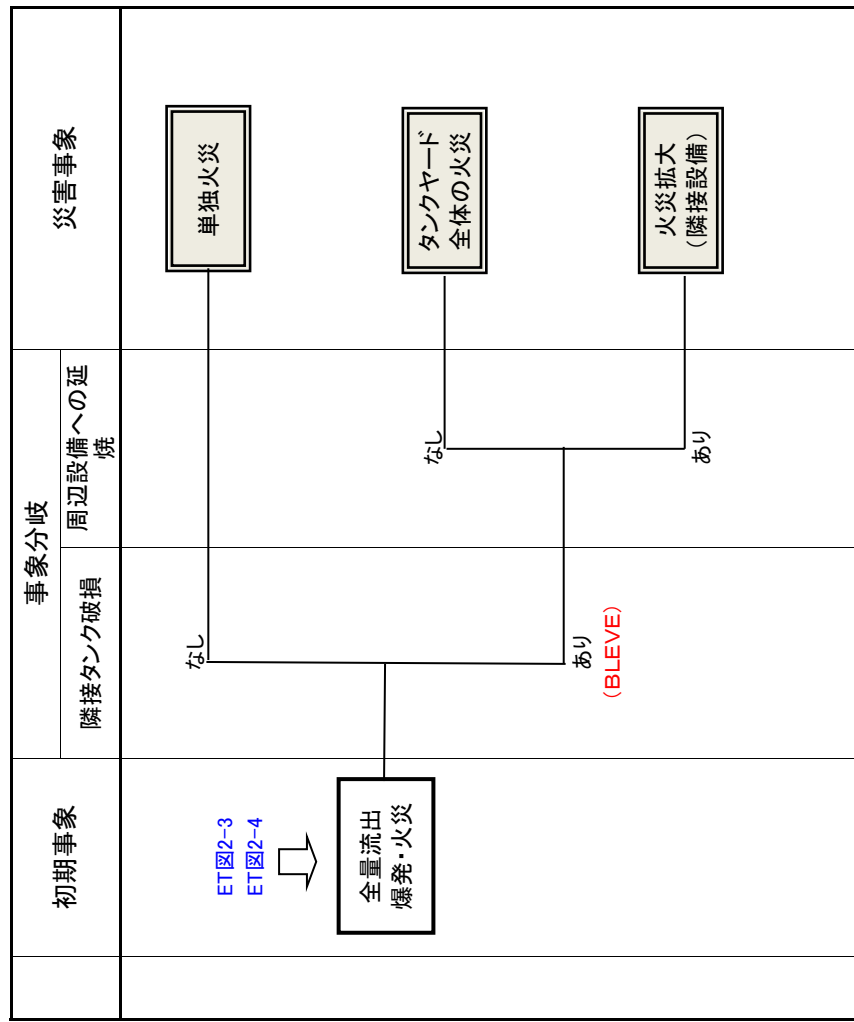
ET図5-1 防油堤から海上への流出(危険物タンク)



ET図5ー2 防油堤火災からの延焼拡大(危険物タンク)




ET図5-3 BLEVEによる延焼拡大(可燃性ガスタンク)






ET図6-1 配管の破損による漏洩(津波・危険物タンク)

初期事象	事象分岐					災害事象
	緊急遮断	バルブ手動閉止	防油堤	流出油防止堤	着火	
津波浸水  <div>配管の破損による漏洩</div>	成功					少量流出・火災
	失敗	成功				少量流出・火災
		失敗	成功 (堤外一部流出)		なし	防油堤内流出
					あり	防油堤内 流出火災
<div>           *1) 浸水深によっては、防油堤や流出油防止堤はほとんど機能しない。            *2) 同時に複数のタンクが被災し、大量の油が流出・拡大する可能性がある。         </div>		成功		成功 (堤外一部流出)	なし	
		失敗			あり	事業所内 流出火災
			失敗 (堤外大量流出)			
				失敗 (堤外大量流出)		事業所外 流出火災 陸上・海上

ET図6-2 タンクの移動・転倒洩（津波・危険物タンク）

初期事象	事象分岐						災害事象
	破損・漏洩（大破）	緊急遮断	バルブ手動閉止	防油堤	流出油防止堤	着火	
津波浸水  タンクの移動・転倒	配管破損	成功					少量流出・火災
							少量流出・火災
		失敗	成功	成功 (堤外一部流出)		なし	防油堤内流出
						あり	防油堤内 流出火災
		失敗	失敗		成功 (堤外一部流出)	なし	
						あり	事業所内 流出火災
				失敗 (堤外大量流出)		なし	
					失敗 (堤外大量流出)	あり	事業所外 流出火災

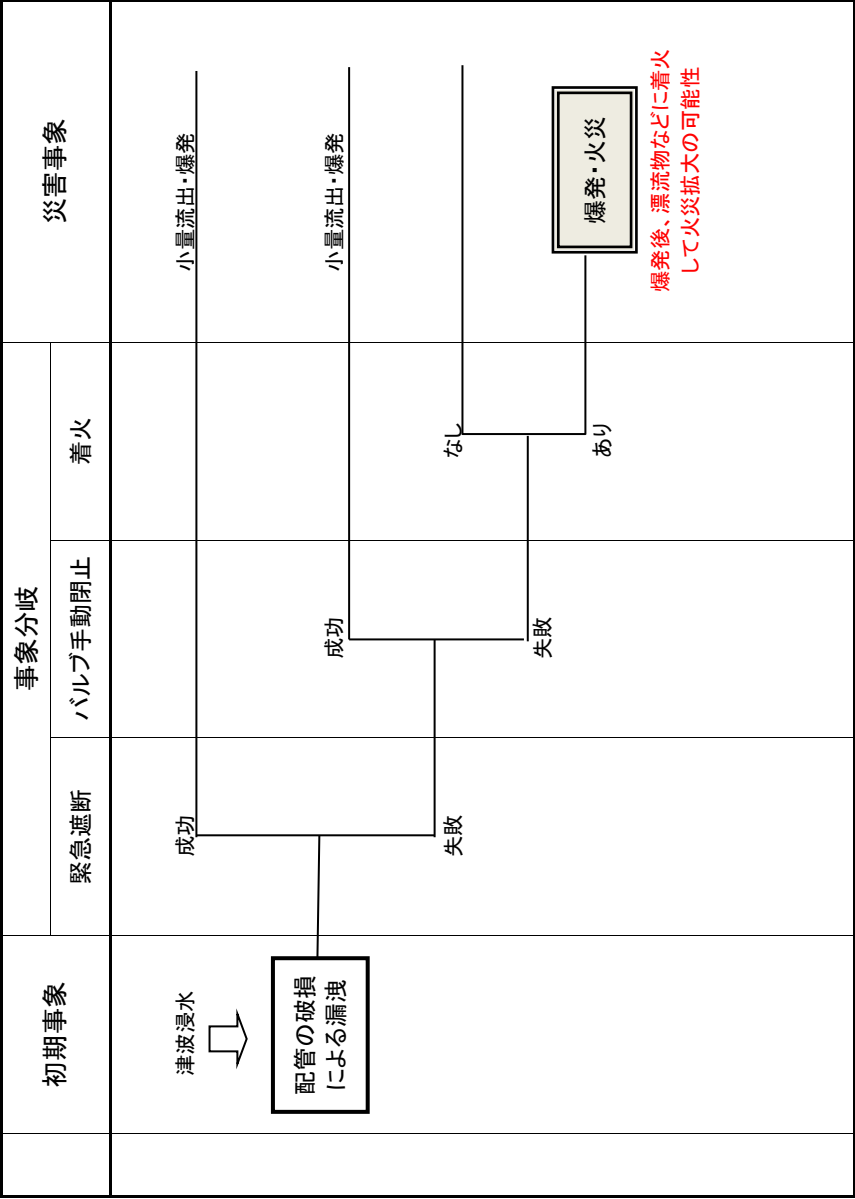
陸上・海上

初期事象	事象分岐						災害事象
	破損・漏洩(大破)	緊急遮断	バルブ手動閉止	防油堤	流出油防止堤	着火	
				成功 (堤外一部流出)		なし	
						あり	防油堤内 流出火災
	本体破損				成功 (堤外一部流出)	なし	
						あり	事業所内 流出火災
				失敗 (堤外大量流出)		なし	
					失敗 (堤外大量流出)	あり	事業所外 流出火災 陸上・海上
	<p>*1) 浸水深によっては、防油堤や流出油防止堤はほとんど機能しない。</p> <p>*2) 同時に複数のタンクが被災し、大量の油が流出・拡大する可能性がある。</p>						

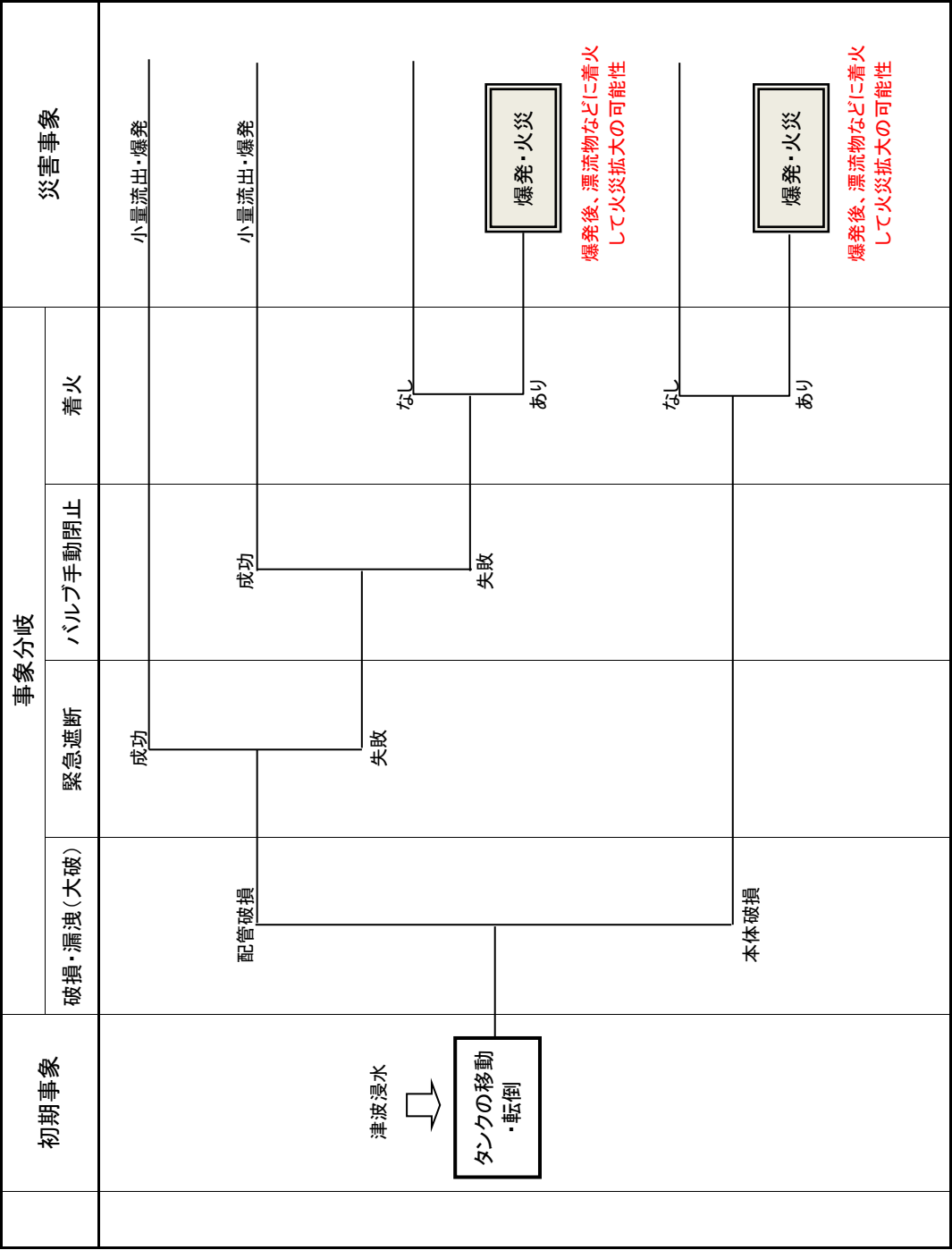
ET図6－3 地震による流出後の津波（津波・危険物タンク）

初期事象	事象分岐				災害事象
	防油堤内浸水	防油堤外流出	流出油防止堤	着火	
<div>地震発生 ↓ 破損・大量漏洩 ↓ <div>防油堤内 流出</div> ↑ 津波</div>	なし			なし	
				あり	<div>防油堤内 流出火災</div>
		なし (堤外一部流出)		なし	<div>防油堤内 流出火災</div>
	あり		成功 (堤外一部流出)	あり	<div>事業所内 流出火災</div>
		あり (堤外大量流出)		なし	
			失敗 (堤外大量流出)	あり	<div>事業所外 流出火災</div> 陸上・海上

ET図6ー4 配管の破損による漏洩(津波・可燃性ガスタンク)



ET図6ー5 タンクの移動・転倒(津波・可燃性ガスタンク)



## 参考資料 2 災害現象解析モデルの一例

## 参考資料2 災害現象解析モデルの一例

石油コンビナートの施設が破損して可燃性や毒性の危険物質が漏洩したときの現象を解析するためのモデルは、国内外の研究機関や研究者により数多くのものが提案されている。ここでは、参考として以下の現象に関するモデルの一例を示す。

- ① 流出モデル
  - 液体流出
  - 気体流出
- ② 蒸発モデル
  - 揮発性液体の蒸発
  - 過熱液体の蒸発
- ③ 拡散モデル
- ④ 火災・爆発モデル
  - 液面火災
  - 蒸気雲爆発
  - ファイヤーボール
  - フラッシュ火災
  - 容器破裂
  - 飛散物

ここで示したモデルは簡易なものであり、防災アセスメント実施者が市販の表計算ソフトを利用するなどして容易に適用できる。その一方で、漏洩物質の特性や漏洩時の挙動などを詳細に反映したものではない。石油コンビナートの防災アセスメントにおいては、このような簡易モデルを適用することで目的は十分に達成できると考えられる。さらに、詳細な評価が必要な場合には、評価目的や災害現象にあわせて専用のソフトウェアを入手して利用されたい。



## 1. 流出モデル

### (1) 液体流出

危険物質を液相で貯蔵した容器（または付属配管で容器に近いところ）が破損したときの流出率は次式で与えられる。ただし、容器の大きさに比べて流出孔が十分に小さく、流出が継続する間は液面の高さは変化しないことを前提とする。

$$q_L = ca \sqrt{2gh + \frac{2(p - p_0)}{\rho}} \quad (\text{式 1})$$

ただし、

$q_L$  : 液体流出率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$c$  : 流出係数（不明の場合は 0.5 とする）

$a$  : 流出孔面積 ( $\text{m}^2$ )

$p$  : 容器内圧力 (Pa)

$p_0$  : 大気圧力 ( $= 0.101 \text{ MPa} = 0.101 \times 10^6 \text{ Pa}$ )

$\rho$  : 液密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  : 重力加速度 ( $= 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ )

$h$  : 液面と流出孔の高さの差 (m)

長い配管から流出するような場合には、配管内壁と流体との摩擦による圧力損失を考慮すべきであるが、これを無視して次式により安全サイドの評価として概算することができる。

$$q_L = ca \sqrt{v^2 + \frac{2(p - p_0)}{\rho}} \quad (\text{式 2})$$

ただし、

$v$  : 配管内の流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )

$p$  : 送出圧力 (Pa)

例 1-1) 原油タンク（液面高さ 15m）の側板下部に  $10\text{cm}^2$  の孔が開いたときの流出率。

$$a = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$c = 0.5$$

$$h = 15 \text{ m}$$

$$p = p_0$$

として流出率は式 1 により、

$$q_L = 0.5 \times 10 \times 10^{-4} \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 15} = 0.0086 \text{ m}^3/\text{s}$$

例 1-2) 直径 10m、貯蔵温度 20℃、貯蔵圧力 0.6MPa（ゲージ圧：絶対圧から大気圧を引いた圧力）の球形プロパンタンクの底部配管に  $1\text{cm}^2$  の孔が開いたときの流出率。

$$a = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$c = 0.5$$

$$h = 10 \text{ m (タンク直径とする)}$$

$$p - p_0 = 0.6 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\rho = 500.5 \text{ kg/m}^3 \text{ (20℃)}$$

として流出率は式 1 により、

$$q_L = 0.5 \times 1 \times 10^{-4} \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 10 + \frac{2 \times 0.6 \times 10^6}{500.5}} = 0.0025 \text{ m}^3 / \text{s}$$

## (2) 気体流出

容器内に物質が気相で存在する場合の流出率は次式で与えられる。ただし、容器のサイズに比べて流出孔が十分に小さく、気体の噴出に熱的变化がないことを仮定している。

### ① 流速が音速未満 ( $p_0/p > \gamma_c$ ) のとき

$$q_G = cap \sqrt{\frac{2M}{ZRT} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left\{ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (\text{式 3})$$

### ② 流速が音速以上 ( $p_0/p \leq \gamma_c$ ) のとき

$$q_G = cap \sqrt{\frac{M}{ZRT} \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{式 4})$$

ただし、

$$\gamma_c = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$q_G$  : 気体流出率 (kg/s)

$c$  : 流出係数 (不明の場合は 0.5 とする)

$a$  : 流出孔面積 ( $\text{m}^2$ )

$p$  : 容器内圧力 (Pa)

$p_0$  : 大気圧力 ( $= 0.101 \text{ MPa} = 0.101 \times 10^6 \text{ Pa}$ )

$M$  : 気体のモル重量 (kg/mol)

$T$  : 容器内温度 (K)

$\gamma$  : 気体の比熱比

$R$  : 気体定数 ( $= 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ )

$Z$  : ガスの圧縮係数 ( $= 1.0$  : 理想気体)

例 1-3) 貯蔵温度 25℃、貯蔵圧力 0.05MPa (ゲージ圧) の天然ガス (メタンとする) の容器に 1cm<sup>2</sup> の孔が開いたときの流出率。

$$a = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$c = 0.5$$

$$p_0 = 0.101 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$p = 0.151 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (p - p_0 = 0.05 \times 10^6 \text{ Pa})$$

$$M = 16 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

$$\gamma = 1.3$$

とすると、

$$p_0 / p = 0.101 / 0.151 = 0.67$$

$$\gamma_c = \left( \frac{2}{1.3 + 1} \right)^{\frac{1.3}{1.3-1}} = 0.55$$

$p_0 / p > \gamma_c$  により式 3 を用いる。

$$\frac{2M}{ZRT} = \frac{2 \times 16 \times 10^{-3}}{1.0 \times 8.314 \times 298} = 1.29 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} = \frac{1.3}{1.3 - 1} = 4.33$$

$$\frac{2}{\gamma} = 1.54$$

$$\frac{\gamma + 1}{\gamma} = \frac{1.3 + 1}{1.3} = 1.77$$

となり流出率は、

$$q_G = 0.5 \times 10^{-4} \times 0.151 \times 10^6 \sqrt{1.29 \times 10^{-5} \times 4.33 \times (0.67^{1.54} - 0.67^{1.77})} = 0.012 \text{ kg / s}$$

例 1-4) 上記で貯蔵圧力が 0.2MPa (ゲージ圧) としたときの流出率。

$$p_0 = 0.101 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$p = 0.301 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (p - p_0 = 0.2 \times 10^6 \text{ Pa})$$

となり、

$$p_0 / p = 0.101 / 0.301 = 0.34$$

したがって、 $p_0 / p \leq \gamma_c$  により式 4 を用いる。

$$\frac{M}{ZRT} = \frac{16 \times 10^{-3}}{1.0 \times 8.314 \times 298} = 6.46 \times 10^{-6}$$

$$\frac{2}{\gamma+1} = \frac{2}{1.3+1} = 0.87$$

$$\frac{\gamma+1}{\gamma-1} = \frac{1.3+1}{1.3-1} = 7.67$$

となり流出率は、

$$q_G = 0.5 \times 10^{-4} \times 0.301 \times 10^6 \sqrt{6.46 \times 10^{-6} \times 1.3 \times 0.87^{7.67}} = 0.026 \text{ kg/s}$$

## 2. 蒸発モデル

### (1) 揮発性液体の蒸発

常温の揮発性液体が流出して矩形の囲いの中に溜まった場合、液面からの蒸発量は風速に支配され次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$w = 0.033 \rho_g u \left( \frac{p_v}{p_0} \right) \left( \frac{\nu}{u l} \right)^{0.2} \quad (\text{式5})$$

ただし、

w : 蒸発率 (kg/m<sup>2</sup>s)

$\rho_g$  : 周辺温度における蒸気密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$p_v$  : 液面温度での飽和蒸気圧(Pa)

$p_0$  : 大気圧 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)

u : 風速 (m/s)

l : 風方向の囲いの長さ (m)

$\nu$  : 空気の動粘性係数 ( =0.151×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s : 20℃  
=0.154×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s : 25℃)

例 2-1) 常温 (20℃) のアクリロニトリルが流出して 20m 四方の囲いに溜まったときの蒸発率。

$$u = 2.0 \text{ m/s}$$

$$\rho_g = 2.17 \text{ kg/m}^3$$

$$p_v = 13.328 \text{ kPa (22.8℃)}$$

$$p_v/p_0 = 13.328/101=0.13$$

$$l = 20 \text{ m}$$

として蒸発率は式5により、

$$w = 0.033 \times 2.17 \times 2.0 \times 0.13 \times \left( \frac{0.151 \times 10^{-4}}{2.0 \times 20} \right)^{0.2} = 9.7 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

### (2) 過熱液体の蒸発

沸点以上の温度で圧力をかけて液化したガスが漏洩して瞬間的に気化する現象をフラッシュと呼び、気化する液量と流出した液量の比をフラッシュ率と呼ぶ。フラッシュ率はガスの種類と流出前の温度によって決まり、次式で与えられる。

$$f = \frac{H - H_b}{h_b} = C_p \frac{T - T_b}{h_b} \quad (\text{式 6})$$

ただし、

f : フラッシュ率

T : 液体の貯蔵温度 (K)

H : 液体の貯蔵温度におけるエンタルピー (J/kg)

T<sub>b</sub> : 液体の大気圧での沸点 (K)

H<sub>b</sub> : 液体の沸点におけるエンタルピー (J/kg)

C<sub>p</sub> : 液体の比熱 (T<sub>b</sub> ~ T の平均 : J/kg・K)

h<sub>b</sub> : 沸点での蒸発潜熱 (J/kg)

例 2-2) プロパンタンク (貯蔵温度 25℃) から流出したときのフラッシュ率。

$$T = 298 \text{ K}$$

$$T_b = 231 \text{ K}$$

$$C_p = 2.45 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_b = 429 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

としてフラッシュ率は式 6 より、

$$f = 2.45 \times \frac{298 - 231}{429} = 0.38$$

### 3. 拡散モデル

ガスが流出して大気中で拡散したときの濃度分布を計算するための簡易モデルとしてガウシアンモデルがある。このモデルは、ガスの進行方向（風下方向）に対して直角方向の濃度分布を正規分布と仮定して解析するものである。ガウシアンモデルにはいくつかのものがあるが、海外ではブルームモデル（Pasquill-Gifford モデル）、国内では坂上モデルがよく用いられているようである。以下にこれらのモデルを示す。なお、ガウシアンモデルでは、対象とするガスの密度が周囲の空気密度と同程度であることを仮定している。空気よりも非常に軽いガスや重いガスの場合には、実際の拡散距離とガウシアンモデルによる算定値にかなりの差が生じるものと考えられ、注意が必要である。

#### (1) 坂上モデル

坂上モデルには、ガスの発生源が点源と面源、ガスの発生時間が連続的と瞬間的の計 4 種類がある。点源の式は小さな開口部からガスが流出するような場合、面源の式は流出した液化ガスが防液堤に溜まって蒸発するような場合に適用される。以下に、よく用いられるガスの発生が連続的な点源と面源の式を示す。防液堤に溜まって蒸発するような場合でも、防液堤から遠いところでは面からの蒸発ガス量が 1 点から発生するとして点源の式を用いてもよい。

# ① 連続点源の式

連続点源を想定したときの濃度分布は次式で与えられる。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(\frac{-y^2}{A}\right) \exp\left(\frac{-(h+z)}{B}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (\text{式 7})$$

$$A = q_A \{\phi_A x + \exp(-\phi_A x) - 1\}$$

$$B = q_B \{\phi_B x + \exp(-\phi_B x) - 1\}$$

ただし、

$C_{xyz}$  : 任意の地点 (x, y, z) のガス濃度 (体積比率)

x は水平風下方向、y は水平風横方向、z は鉛直方向にとった座標

Q : 単位時間あたりの拡散ガス量 (m<sup>3</sup>/s)

u : 風速 (m/s)

h : ガス発生源の高さ (m)

(0, 0, h) が発生源の座標となる。

qA, qB,  $\phi_A$ ,  $\phi_B$  : 拡散パラメータ (表 1)

$I_0$  : 0 次の虚数単位ベッセル関数 ( $I_0(X) = J_0(iX)$ ) :  $J_0$  は 0 次ベッセル関数)

表 1 坂上モデルの拡散パラメータの値<sup>2)</sup>

大気安定度	h(m)	$\phi_A$	$\sqrt{q_A}$	$\phi_B$	qB
安 定	0.5	$4.78 \times 10^{-2}$	4.26	$4.20 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-1}$
	10	$4.78 \times 10^{-2}$	4.26	$4.60 \times 10^{-2}$	$2.93 \times 10^{-1}$
	20	$4.78 \times 10^{-2}$	4.26	$4.71 \times 10^{-2}$	$2.86 \times 10^{-1}$
	30	$4.78 \times 10^{-2}$	4.26	$4.77 \times 10^{-2}$	$2.83 \times 10^{-1}$
中 立	0.5	$1.48 \times 10^{-2}$	$1.56 \times 10^1$	$1.10 \times 10^{-2}$	5.30
	10	$1.09 \times 10^{-2}$	$2.18 \times 10^1$	$2.46 \times 10^{-2}$	1.02
	20	$1.01 \times 10^{-2}$	$2.37 \times 10^1$	$3.00 \times 10^{-2}$	$7.00 \times 10^{-1}$
	30	$0.97 \times 10^{-2}$	$2.48 \times 10^1$	$3.29 \times 10^{-2}$	$5.65 \times 10^{-1}$
やや不安定	0.5	$4.50 \times 10^{-3}$	$7.59 \times 10^1$	$4.25 \times 10^{-3}$	$3.48 \times 10^1$
	10	$2.12 \times 10^{-3}$	$1.59 \times 10^2$	$1.48 \times 10^{-2}$	2.87
	20	$1.80 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^2$	$1.98 \times 10^{-2}$	1.61
	30	$1.61 \times 10^{-3}$	$2.09 \times 10^2$	$2.34 \times 10^{-2}$	1.14
不安定	0.5	$1.12 \times 10^{-3}$	$2.77 \times 10^2$	$1.30 \times 10^{-3}$	$3.73 \times 10^2$
	10	$2.52 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^3$	$7.20 \times 10^{-3}$	$1.18 \times 10^1$
	20	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^3$	$1.10 \times 10^{-2}$	5.19
	30	$1.44 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^3$	$1.40 \times 10^{-2}$	3.21

液体で流出したときには、式 1 または式 2 で求められる流出率  $q_L$  (m<sup>3</sup>/s) をもとに、次式により拡散ガス量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) を計算し、これを式 7 に代入して拡散ガス濃度を計算する。

$$Q = \frac{q_L f \rho R T}{M p_0} \quad (\text{式 8})$$

ただし、

$f$  : フラッシュ率

$\rho$  : 液密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$R$  : 気体定数 (= 8.314 J/mol・K)

$T$  : 大気温度 (K)

$p_0$  : 大気圧 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)

$M$  : 気体のモル重量 (kg/mol)

小量流出の場合には、すべて気化するとして  $f = 1$  としてよい。また、気体で流出したときには、式 3 または式 4 で求められる流出率  $q_G$  (kg/s) をもとに、次式により拡散ガス量  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) を計算する。

$$Q = \frac{q_G R T}{M p_0} \quad (\text{式 9})$$

なお、風下方向・地表面 ( $y=0$ ,  $z=0$ ) の濃度のみ計算する場合には、式 7 は次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Q}{u B \sqrt{\pi A}} \exp\left(-\frac{h}{B}\right) \quad (\text{式 10})$$

例 3-1) 例 1-2 で漏洩したプロパンが大気中で拡散したとき、風下方向に 100m 離れたところでの濃度。ただし風速 1.0m/s、大気安定度は中立、拡散源の高さは 0.5m とする。

$$q_L = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$f = 1 \quad (\text{小量流出})$$

$$\rho = 500.5 \text{ kg/m}^3 \quad (20^\circ\text{C})$$

$$R = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

$$T = 293^\circ\text{C} \quad (\text{大気温度 } 20^\circ\text{C} \text{ とする})$$

$$M = 44 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$p_0 = 0.101 \times 10^6 \text{ Pa}$$

とすると、拡散ガス量は式 8 により、

$$Q = \frac{2.5 \times 10^{-3} \times 500.5 \times 8.314 \times 293}{44 \times 10^{-3} \times 0.101 \times 10^6} = 0.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

風下方向に 100m 離れたところのガス濃度は、

$$x = 100 \text{ (m)}$$

$$h = 0.5 \text{ (m)}$$

$$u = 1.0 \text{ m/s}$$

$$\phi_A = 1.48 \times 10^{-2} \text{ (大気中立)}$$

$$\phi_B = 1.10 \times 10^{-2}$$

$$\sqrt{q_A} = 15.6$$

$$q_B = 5.30$$

として式 10 により、

$$A = 15.6^2 \{ 1.48 \times 10^{-2} \times 100 + \exp(-1.48 \times 10^{-2} \times 100) - 1 \} = 172.2$$

$$B = 5.30 \{ 1.10 \times 10^{-2} \times 100 + \exp(-1.10 \times 10^{-2} \times 100) - 1 \} = 2.29$$

$$C_x = \frac{0.69}{2.29 \sqrt{3.14 \times 172.2}} \exp\left(-\frac{0.5}{2.29}\right) = 0.01 \quad (1.0\%)$$

## ② 連続面源の式

連続面源を想定したときの濃度分布は次式で与えられる。

$$C_{xyz} = \frac{Qe^{\frac{z+h}{B}} \sqrt{A}}{4uB} \left\{ \Lambda\left(\frac{x+n}{\sqrt{A}}\right) - \Lambda\left(\frac{x-n}{\sqrt{A}}\right) \right\} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{y+m}{\sqrt{A}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-m}{\sqrt{A}}\right) \right\} I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (\text{式 11})$$

$$\Lambda(\eta) = \eta \operatorname{erf}(\eta) + \eta + \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta^2}$$

$$\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt \quad (\text{誤差関数})$$

ただし、

$C_{xyz}$  : 任意の地点 (x, y, z) のガス濃度 (体積比率)

$Q$  : 単位時間、単位面積あたりの拡散ガス量 ( $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ )

$m$  : 風に直角方向の面源の幅の 1/2 (m)

$n$  : 風方向の面源の幅の 1/2 (m)

であり、その他の記号は点源式 (式 7) と同じである。

なお、風下方向・地表面 ( $y=0$ 、 $z=0$ ) の濃度のみ計算する場合には、式 7 は次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Qe^{\frac{h}{B}} \sqrt{A}}{4uB} \left\{ \Lambda\left(\frac{x+n}{\sqrt{A}}\right) - \Lambda\left(\frac{x-n}{\sqrt{A}}\right) \right\} \left\{ 2\operatorname{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{A}}\right) \right\} \quad (\text{式 12})$$



## (2) プルームモデル (Pasquill-Gifford モデル)

プルームモデルは、坂上モデルの連続点源式に該当するモデルで、任意の地点のガス濃度は次式で表される。この式は、海外のリスク評価、また国内でも大気汚染の分野でよく用いられている。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (\text{式 13})$$

ただし、

$C_{xyz}$  : 任意の地点(x,y,z)のガス濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

Q : 単位時間あたりの拡散ガス量 (kg/s)

u : 風速 (m/s)

h : ガス発生源の高さ (m)

$\sigma_y, \sigma_z$  : 拡散係数 (y 方向、z 方向の濃度分布の標準偏差 : m)

$\sigma_y, \sigma_z$  は大気安定度 (Pasquill の区分 A～F) 別に次式で与えられるが<sup>3)</sup>、石油コンビナートに適用する場合は Rural Conditions を選択するのが妥当と考えられる。

### [Rural Conditions (地方)]

A	: $\sigma_y = 0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.20x$	: 強不安定
B	: $\sigma_y = 0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.12x$	: 不安定
C	: $\sigma_y = 0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$	: 弱不安定
D	: $\sigma_y = 0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$	: 中立
E	: $\sigma_y = 0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.03x(1+0.0003x)^{-1}$	: 弱安定
F	: $\sigma_y = 0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.01x(1+0.0003x)^{-1}$	: 強安定

### [Urban Conditions (都市)]

A・B	: $\sigma_y = 0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.24x(1+0.001x)^{-1/2}$
C	: $\sigma_y = 0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.20x$
D	: $\sigma_y = 0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.14x(1+0.003x)^{-1/2}$
E・F	: $\sigma_y = 0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$\sigma_z = 0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

## 4. 火災・爆発モデル

### (1) 液面火災

#### ア. 火災の放射熱

火災から任意の相対位置にある面が受ける放射熱は次式で与えられる。

$$E = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{式 14})$$

ただし、

$E$  : 放射熱強度 ( $\text{W/m}^2$ )

$T$  : 火炎温度 ( $\text{K}$ )

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 ( $=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$\varepsilon$  : 放射率

$\phi$  : 形態係数(0.0～1.0 の無次元数)

実用上は、燃焼液体が同じであれば火炎温度と放射率は変わらないと仮定し、 $R_f = \varepsilon \sigma T^4$  ( $\text{W/m}^2$ ) において次式で計算してよい。

$$E = \phi R_f \quad (\text{式 } 15)$$

ここで  $R_f$  は放射発散度と呼ばれ、主な可燃性液体については表 2 に示すような値をとる。

表 2 主な可燃性液体の放射発散度<sup>4)</sup>

可燃性液体	放射発散度 ( $\text{kW/m}^2$ )	可燃性液体	放射発散度 ( $\text{kW/m}^2$ )
カフジ原油	41	メタノール	9.8
ガソリン・ナフサ	58	エタノール	12
灯油	50	LNG (メタン)	76
軽油	42	エチレン	134
重油	23	プロパン	74
ベンゼン	62	プロピレン	73
n-ヘキサン	85	n-ブタン	83

## イ. 形態係数

### ① 円筒形の火炎

円筒形の火炎を想定し、図 1 に示すように火炎底面と同じ高さにある受熱面を考えたとき、形態係数は次式により与えられる。また、受熱面が火炎底面と異なる高さにある場合の形態係数の計算は図 2 のように計算する。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right] \quad (\text{式 } 16)$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ただし、

H：火炎高さ

R：火炎底面半径

L：火炎底面の中心から受熱面までの距離

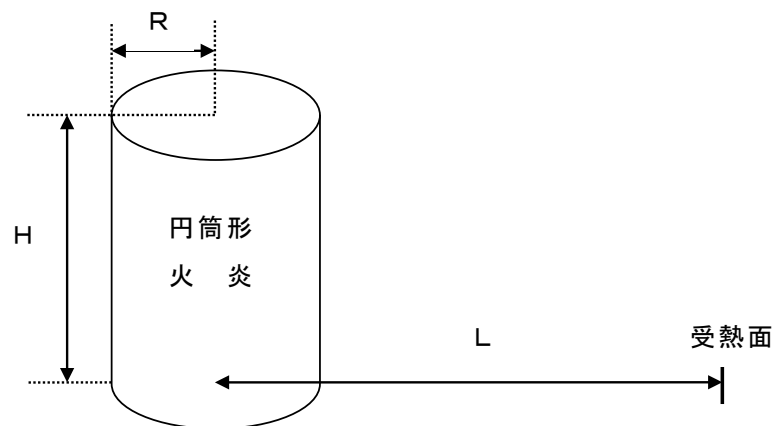


図1 円筒形火炎と受熱面の位置関係

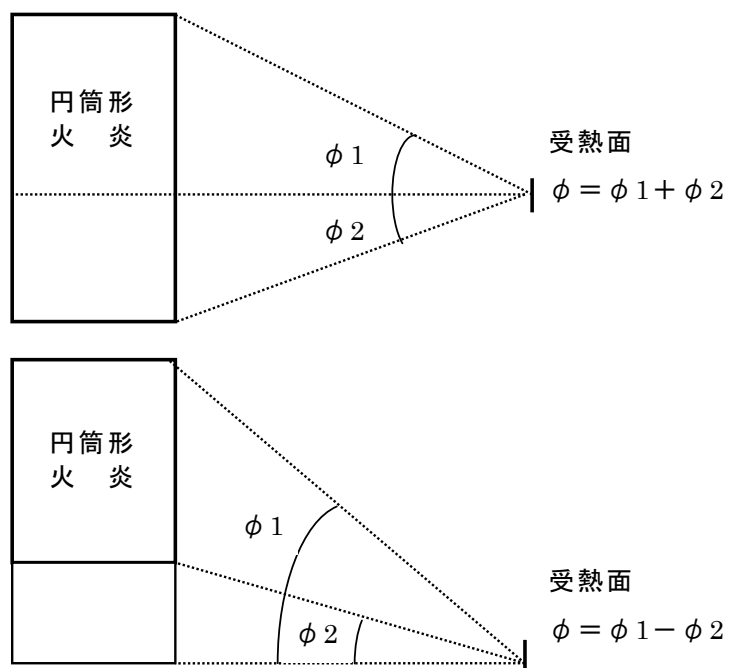


図2 受熱面の高さによる形態係数の計算例

## ② 直方体の火炎

直方体の火炎を想定したときの形態係数は、図3に示すような受熱面の位置に対して次式により与えられる。

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{X}{\sqrt{X^2 + 1}} \tan^{-1} \left( \frac{Y}{\sqrt{X^2 + 1}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + 1}} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{Y^2 + 1}} \right) \right] \quad (\text{式 17})$$

$$X = H/L$$

$$Y = W/L$$

ただし、

H : 火炎高さ

W : 火炎前面幅

L : 火炎前面から受熱面までの距離

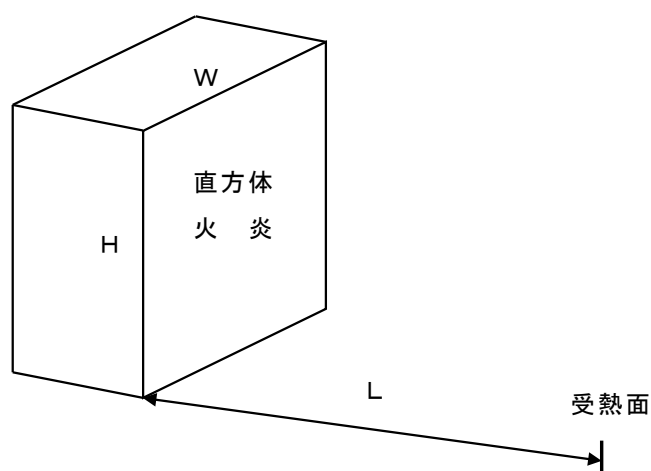


図3 直方体火炎と受熱面の位置関係

#### ウ. 火炎の想定

液面火災による放射熱を計算するためには火炎の形状を決める必要があり、一般に次のような想定がよく用いられる。

##### ① 流出火災

可燃性液体が小さな開口部から流出し、直後に着火して火災となるような場合には、火災面積は次式で表わされる。

$$S = \frac{q_L}{V_B} \quad (\text{式 18})$$

ただし、

S : 火災面積 (m<sup>2</sup>)

q<sub>L</sub> : 液体の流出率 (m<sup>3</sup>/s)

V<sub>B</sub> : 液体の燃焼速度 (液面降下速度 : m/s)

燃焼速度は、可燃性液体によって固有の値をとり、主な液体については表 3 に示すとおりである。

流出火災については、式 18 で得られる火災面積と同面積の底面をもち、高さが底面半径の 3 倍 ( $m=H/R=3$ ) の円筒形火炎を想定して放射熱の計算を行う。

表 3 主な可燃性液体の燃焼速度（液面降下速度）<sup>4)</sup>

可燃性液体	燃焼速度 (m/s)	可燃性液体	燃焼速度 (m/s)
カフジ原油	$0.52 \times 10^{-4}$	メタノール	$0.28 \times 10^{-4}$
ガソリン・ナフサ	$0.80 \times 10^{-4}$	エタノール	$0.33 \times 10^{-4}$
灯油	$0.78 \times 10^{-4}$	LNG（メタン）	$1.7 \times 10^{-4}$
軽油	$0.55 \times 10^{-4}$	エチレン	$2.1 \times 10^{-4}$
重油	$0.28 \times 10^{-4}$	プロパン	$1.4 \times 10^{-4}$
ベンゼン	$1.0 \times 10^{-4}$	プロピレン	$1.3 \times 10^{-4}$
n-ヘキサン	$1.2 \times 10^{-4}$	n-ブタン	$1.5 \times 10^{-4}$

## ② タンク火災

可燃性液体を貯蔵した円筒形タンクの屋根全面で火災となった場合には、タンク屋根と同面積の底面をもち、高さが底面半径の 3 倍 ( $m=H/R=3$ ) の円筒形火炎を想定して放射熱の計算を行う。

## ③ 防油堤火災

可燃性液体が流出し防油堤や仕切堤などの囲いの全面で火災となった場合には、囲いと同面積の底面をもち、高さが底面半径の 3 倍 ( $m=H/R=3$ ) の円筒形火炎を想定する。

## エ. 火炎の規模による放射発散度の低減

液面火災では、火災面積（円筒底面）の直径が 10m を超えると、空気供給の不足により大量の黒煙が発生し放射発散度が低減する。したがって、このことを考慮せずに上記の手法で放射熱を計算すると、火災規模が大きいときにはかなりの過大評価となる。

実験により得られた火炎（燃焼容器）直径と放射発散度との関係を図 4 に示す。これによると、火炎直径が 10m になると放射発散度の低減率は約 0.6、20m で約 0.4、30m で約 0.3 となる。

ただし、アルコールや LNG は燃焼しても黒煙が発生しにくいため、放射発散度は低減しないものとするのが妥当である。

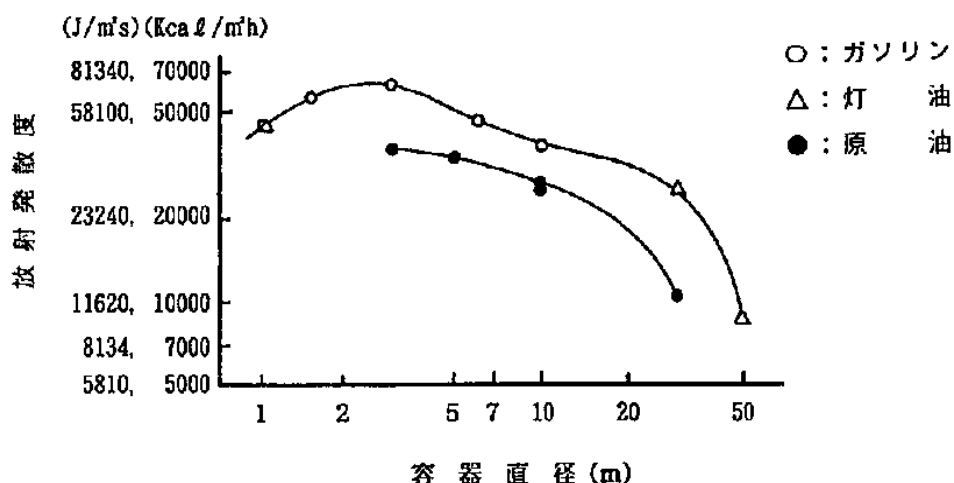


図4 火炎直径と放射発散度との関係<sup>5)</sup>

一方、平成10年から11年に石油公団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構）が消防研究所（現消防庁消防大学校消防研究センター）等と共同で行った燃焼実験の結果、燃焼容器直径（D）と放射発散度の低減率（r）の関係として次式が示されている（図5）。

$$r = \exp(-0.06D) \quad (\text{式19})$$

式19によると、D=20m に対して  $r=0.3$ 、D=30m に対して  $r=0.17$  という低減率になるが、火炎直径の大きいところでのデータが少ないため、 $r=0.3$  程度の値を下限としたほうがよいと考えられる。

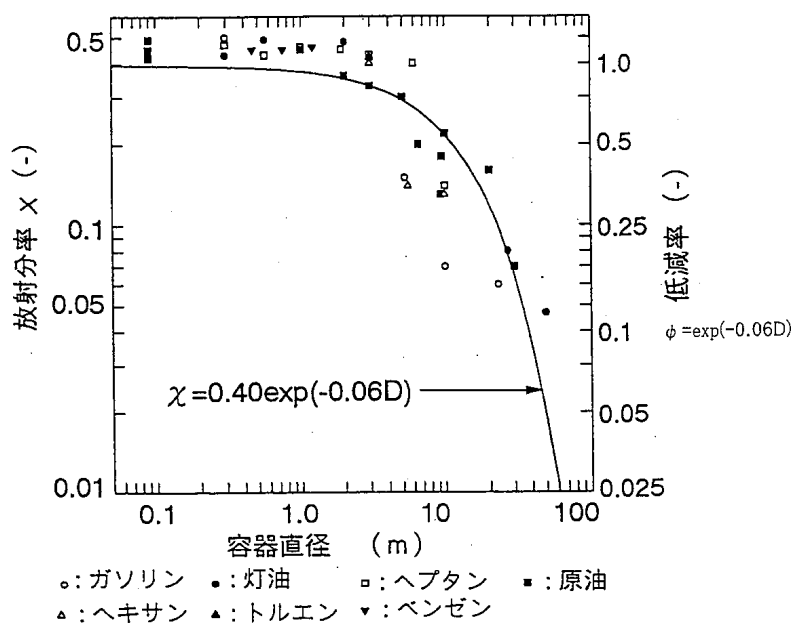


図5 各種燃料の放射分率と容器直径との関係<sup>6)</sup>

例 4-1) 2003 年の十勝沖地震で発生したナフサタンク（直径 42.7m、液面高 17.3m）の全面火災による図 6 の受熱面 1、2 の放射熱。

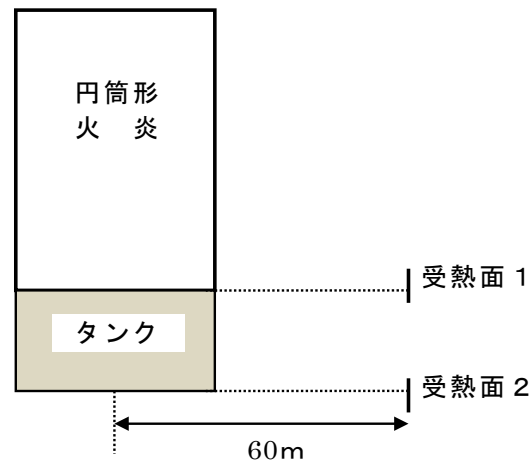


図 6 火炎と受熱面の位置関係

ナフサの放射発散度：58 kW/m<sup>2</sup>（表 2）

タンク半径：R = D / 2 = 21.4 m

放射発散度の低減率は、

$$r = \exp(-0.06 \times 42.7) = 0.08 \quad (\rightarrow \text{下限の } 0.3 \text{ とする})$$

放射発散度：R<sub>f</sub> = 0.3 × 58 = 17.4 kW/m<sup>2</sup>

受熱面 1 における放射熱は、

$$\text{火炎高さ：} H = 1.5 \cdot D = 64.1 \text{ m}$$

$$m = H / R = 64.1 / 21.4 = 3.0$$

$$n = L / R = 60 / 21.4 = 2.8$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2 = 23.5$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2 = 12.3$$

$$\phi = 0.164 \text{ (式 16)}$$

$$\text{放射熱：} E = 0.164 \times 17.4 = 2.9 \text{ kW/m}^2$$

受熱面 2 における放射熱は、まず、

$$\text{火炎高さ：} H = 64.1 + 17.3 = 81.4 \text{ m}$$

$$m = H / R = 81.4 / 21.4 = 3.8$$

$$n = L / R = 60 / 21.4 = 2.8$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2 = 29.1$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2 = 17.8$$

$$\phi_1 = 0.17 \text{ (式 16)}$$

次に、

$$\text{火炎高さ} : H = 17.3 \text{ m}$$

$$m = H / R = 17.3 / 21.4 = 0.8$$

$$n = L / R = 60 / 21.4 = 2.8$$

$$A = (1 + n)^2 + m^2 = 15.2$$

$$B = (1 - n)^2 + m^2 = 3.9$$

$$\phi^2 = 0.085 \text{ (式 16)}$$

したがって、

$$\text{放射熱} : E = (0.17 - 0.085) \times 17.4 = 1.5 \text{ kW/m}^2$$

## (2) 蒸気雲爆発

流出した可燃性ガス（液化ガスを含む）が拡散し、空気との混合が進んだ後に着火した場合、激しい爆風圧を発生する爆轟が起こる可能性がある。この際の爆風圧と爆発中心からの距離との関係は、TNT 等価法による次式で与えられる。

$$L = \lambda^3 \sqrt{W_{TNT}} = \lambda^3 \sqrt{\frac{W_G f \psi Q_G \gamma}{Q_{TNT}}} \quad (\text{式 20})$$

ここで、

L : 爆発中心からの距離 (m)

$\lambda$  : 換算距離 ( $\text{m/kg}^{1/3}$ )

$W_{TNT}$  : 等価の TNT 火薬量 (TNT 当量 : kg)

$W_G$  : 可燃性ガス（液体）の流出量 (kg)

$Q_G$  : 可燃性ガスの燃焼熱量 (J/kg)

$Q_{TNT}$  : TNT 火薬の燃焼熱量 ( $= 4.184 \times 10^6 \text{ J/kg}$ )

f : 流出したガスの気化率（フラッシュ率）

$\phi$  : 爆発係数 ( $= 0.1$ )

$\gamma$  : TNT 収率 ( $= 0.064$ )

爆発係数  $\phi$  は流出・気化したガスのうち爆発に寄与するガスの割合であり、通常 0.1（10%）が用いられる。また、TNT 収率  $\gamma$  は爆発に寄与したガスの総エネルギーと、この場合に生じた爆風圧に相当する TNT 当量のエネルギーの割合であり、通常安全側の評価を見込んで 0.064（6.4%）が用いられる。

換算距離  $\lambda$  は、図 7 により爆風圧 (Pa) と対応する。この図の換算距離 ( $\lambda$ ) と爆風圧 (P) との関係は次のような近似式で表すことができる（ただし爆風圧の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ ）<sup>7)</sup>

$$\bigcirc \quad P < 0.035 \quad : \quad \lambda = 2.7944 P^{-0.71448}$$

$$\bigcirc \quad 0.035 \leq P < 0.2 \quad : \quad \lambda = 2.4311 P^{-0.75698}$$

$$\bigcirc \quad 0.2 \leq P < 0.65 \quad : \quad \lambda = 3.143 P^{-0.59261}$$



$$\bigcirc \quad P \geq 0.65 \quad : \quad \lambda = 3.2781 P^{-0.48551}$$

なお、高圧ガス保安法では、式 20 を次式のように表し、K の値を表 4 のようにガスの種類ごとに示している（燃焼熱量の単位を kcal/kg で表しており  $Q_{TNT}$  は 1,000kcal/kg としている。また K 値に  $10^3$  が掛かるのは  $W_G$  をトンで表しているためである）。

$$\begin{aligned} L &= 0.04 \lambda \sqrt[3]{K W_G} \\ K &= f \psi Q_G \times 10^3 \end{aligned} \quad (\text{式 21})$$

この式では、TNT 当量を次のように見積もっていることになる

$$W_{TNT} = \frac{0.064 K W_G}{1000} \quad (\text{式 22})$$

同法では、既存施設に対しては  $\lambda=12.0$ （爆風圧 11.76kPa）、新規施設に対しては  $\lambda=14.4$ （爆風圧 9.8kPa）を限界強度として保安距離を確保するものとしている。

例 4-2) 25℃で貯蔵している液化プロパン 5000kg が漏洩して爆発したときの爆風圧。

$$W_G = 5000 \text{ kg}$$

$$K = 328 \text{ (25℃)}$$

であり、爆風圧が 5 kPa (0.051 kgf/cm<sup>2</sup>) となる距離は、

$$\lambda = 2.4311 \times 0.051^{-0.75698} = 23.1$$

$$L = 0.04 \times 23.1 \times \sqrt[3]{328 \times 5000} = 109 \text{ m}$$

また、爆風圧が 2 kPa (0.02 kgf/cm<sup>2</sup>) となる距離は、

$$\lambda = 2.7944 \times 0.02^{-0.71448} = 45.7$$

$$L = 0.04 \times 45.7 \times \sqrt[3]{328 \times 5000} = 216 \text{ m}$$

例 4-3) 東日本大震災では、LPG タンク（プロパン）が BLEVE (P.73 の注釈参照) により破損、爆発して周囲に被害を与えた。最初に爆発した容量 2,000kl のタンクについて、当時の液化プロパンの残量は 600kl (約 300,000kg) であったとされており<sup>8)</sup>、このほぼ全量が気化して爆発したと仮定したときの爆風圧。

注) このときの爆風圧は BLEVE によるタンク破裂の影響とも考えられるが、ここでは BLEVE 直後の蒸気雲爆発による爆風圧を想定して算定する。

$$W_G = 300,000 \text{ kg}$$

$$K = 888 \text{ (BLEVE によるため最大値を用いる)}$$

であり、爆風圧が 5 kPa (0.051 kgf/cm<sup>2</sup>) となる距離は、

$$\lambda = 2.4311 \times 0.051^{-0.75698} = 23.1$$

$$L = 0.04 \times 23.1 \times \sqrt[3]{888 \times 300000} = 595m$$

また、爆風圧が 2 kPa (0.02 kgf/cm<sup>2</sup>) となる距離は、

$$\lambda = 2.7944 \times 0.02^{-0.71448} = 45.7$$

$$L = 0.04 \times 45.7 \times \sqrt[3]{888 \times 300000} = 1177 m$$

上記の TNT 等価法は、簡易に爆風圧を推定することができるが、開放空間における爆轟を前提としており、現実的にはほとんど起こり得ない現象であると指摘されている<sup>3)</sup>。また、計算値と実測値とを比較した結果によれば、爆轟を起こしているものについてはほぼ一致しているが、爆燃していると考えられるものについては過大評価であるとの報告がある<sup>9)</sup>。

このほかの爆風圧の解析モデルとしては、TNO multi-energy モデル、Baker-Strehlow モデルがある。これらは蒸気雲爆発（爆燃）を前提としたモデルであり、より現実的なモデルであるとされている<sup>3)</sup>。しかしながら、TNO multi-energy モデルでは可燃性ガスがどの程度の範囲（容積）で爆発するかを設定することで爆発強度を見積もる必要があり、Baker-Strehlow モデルでは火炎の拡大方向と障害物の状況により火炎速度を見積もる必要があることから、適用にあたってはこれらの検討が必要である。したがって、一度に数多くの施設を対象とする石油コンビナートの防災アセスメントでこれらのモデルを適用することは難しいといえる。

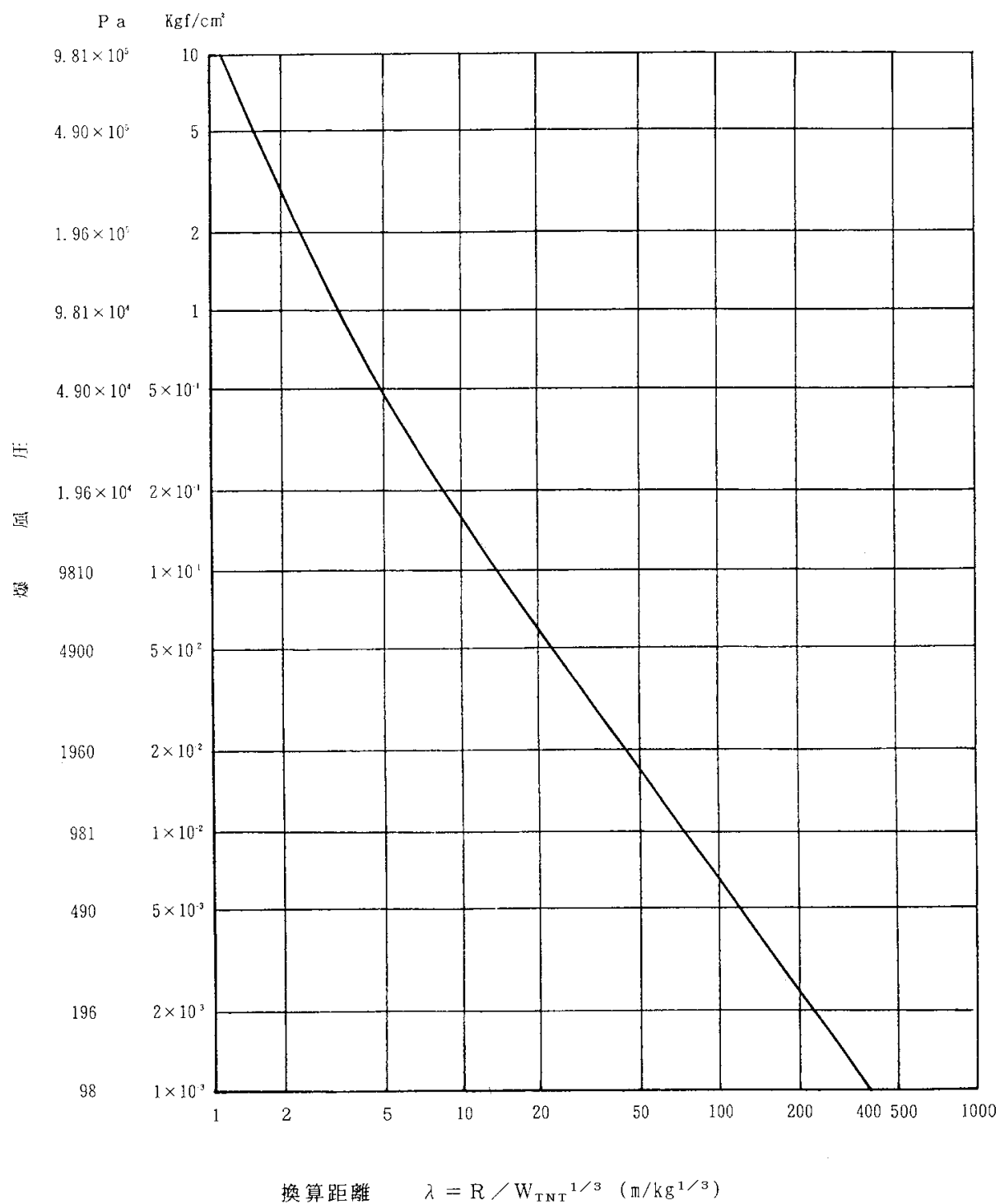


図7 換算距離λと爆風圧との関係<sup>4)</sup>

### (3) ファイヤーボール

蒸気雲爆発にはファイヤーボールを伴うことがある。特に、東日本大震災での事例で見られたように、LPG タンクが BLEVE により破損した場合には、巨大なファイヤーボールが形成され、主に放射熱によって周囲に大きな影響を与える恐れがある。

#### ア. 直径・継続時間

ファイヤーボールの直径と継続時間に関する算定式には次のようなものがある。

##### ① 旧指針（平成 6 年）、コンビナート保安・防災技術指針<sup>10)</sup>

$$D = 3.77 \cdot W^{0.325}$$

$$t = 0.258 \cdot W^{0.349}$$

ここで、

D：ファイヤーボール直径（m）

t：継続時間（s）

W：燃焼ガス量（燃料と理論酸素量の和：kg）

ただし、Wは可燃性ガス量（W<sub>g</sub>）と酸素量の合計である。例えばプロパンの場合、燃焼の反応式は  $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$  であるから、完全燃焼ではプロパン（44g/mol）1 mol に対して酸素（32g/mol）5 mol が必要となる。したがって W は W<sub>g</sub> の 4.64 倍  $((44+32 \times 5) / 44)$  となり、上式は次のように書ける。

$$D = 6.21 \cdot W_g^{0.325}$$

$$t = 0.44 \cdot W_g^{0.349} \quad (\text{式 23})$$

##### ② AIChE（2010）<sup>11)</sup>

$$D = 5.8 \cdot W_g^{1/3}$$

$$t = 0.45 \cdot W_g^{1/3} \quad (W_g < 30000 \text{ kg})$$

$$= 2.6 \cdot W_g^{1/6} \quad (W_g > 30000 \text{ kg}) \quad (\text{式 24})$$

また、ファイヤーボール中心の高さ（H）は字式により与えられる。

$$H = 0.75 \cdot D \quad (\text{式 25})$$

なお、ファイヤーボールの直径及び継続時間と燃料量との関係については、実験に基づきいくつかのモデルが提案されているが、上式はそれらの平均値を与えるものである。

例 4-4) 東日本大震災での BLEVE に伴う LPG タンク爆発ではファイヤーボールが発生した。タンク内のプロパン全量がファイヤーボールの形成に寄与したと仮定したときの直径と継続時間。

$$W_G = 300,000 \text{ kg}$$

として式 23 による直径と継続時間は、

$$D = 6.21 \times 300000^{0.325} = 374 \text{ m}$$

$$t = 0.44 \times 300000^{0.349} = 36 \text{ s}$$

また、式 24 による直径と継続時間は、

$$D = 5.8 \times 300000^{0.333} = 387 \text{ m}$$

$$t = 2.6 \times 300000^{0.167} = 21 \text{ s}$$

実際のファイヤーボールは直径 300m 程度、継続時間は 20s 程度であったとされており、上記の式は概ね妥当な予測値を与えるといえる。ただし、継続時間に関しては式 24 のほうが近い値となっている。

## イ. 放射熱

ファイヤーボールから受ける放射熱は、ステファン・ボルツマンの法則に基づいた次式で表される。

$$E = \phi R_f = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{式 26})$$

ここで、

E : ファイヤーボールから受ける放射熱 (W/m<sup>2</sup>)

R<sub>f</sub> : ファイヤーボールが発散する放射熱 (=  $\varepsilon \sigma T^4$  : W/m<sup>2</sup>)

T : ファイヤーボールの温度 (K)

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 (=  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$\varepsilon$  : 放射率

$\phi$  : 形態係数

形態係数  $\phi$  は、ファイヤーボールを球形と仮定し、球の中心に正対した受熱面を想定すると次式で表される。

$$\phi = \left( \frac{D}{2L} \right)^2 \quad (\text{式 27})$$

ただし、

D : ファイヤーボール直径 (m)

L : ファイヤーボール中心から受熱面までの距離 (m)

式 26 で、ファイヤーボールを 1750K の完全黒体 ( $\varepsilon = 1.0$ ) とし、形態係数として式 27 を代入すると次のようになる。

$$E = 1.33 \times 10^5 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \quad (\text{式 28})$$

例 4-5) 東日本大震災での BLEVE で、ファイヤーボール中心直下から距離Xの地点で受ける放射熱 (図 8 の位置関係)。

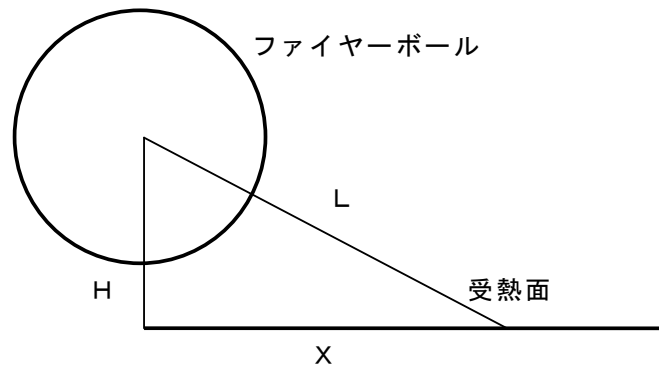


図 8 ファイヤーボールと受熱面の位置関係

$D = 380 \text{ m}$  (例 4-4 から概ね 380m とした)

$H = 0.75 \times 380 = 285 \text{ m}$  (式 25 による)

として距離Xでの放射熱は、

$X = 1000 \text{ m}$

$$L = \sqrt{1000^2 + 285^2} = 1040 \text{ m}$$

$$E = 1.33 \times 10^5 \times \left( \frac{380}{1040} \right)^2 = 17756 \text{ W} / \text{m}^2 = 17.8 \text{ kW} / \text{m}^2$$

$X = 1500 \text{ m}$

$$L = \sqrt{1500^2 + 285^2} = 1527 \text{ m}$$

$$E = 1.33 \times 10^5 \times \left( \frac{380}{1527} \right)^2 = 8238 \text{ W} / \text{m}^2 = 8.2 \text{ kW} / \text{m}^2$$

この計算例のように、直径 380m もの巨大なファイヤーボールの場合、中心から 1000m 離れたところでも  $17.8 \text{ kW/m}^2$  という極めて強い放射熱を受けることになる。しかしながら、放射熱強度の推定値は手法によって大きな開きがあり、式 28 は他の手法に比べてかなり大きめの推定値を与えるようである。これは、ファイヤーボールの温度に関して、式 28 が 1750K という高い値を想定していることによる(ファイヤーボールが発散する放射熱は温度の 4 乗に比例する)。しかしながら、

ファイヤーボールの温度に関してははっきりしたことは言えず、また東日本大震災の事例でも実際にどの程度の放射熱を受けたかは不明であるため、本指針では式 28 を例示しておく。

#### (4) フラッシュ火災

フラッシュ火災とは、可燃性蒸気雲の燃焼で火炎伝播速度が比較的遅く過圧が無視できるものをいう。この場合、爆風圧よりも放射熱が問題になるが、放射熱の影響を算定するためのモデルはほとんど開発されていない。そのため、燃焼プロセスが穏やかで持続時間が短いこと、ガス雲の熱膨張は浮力により鉛直上方に起こることを仮定して、ガス濃度が爆発下限界またはその 1/2 以上となる範囲を危険とする評価がよく用いられる。主な可燃性物質の爆発下限界濃度を K 値とともに表 4 に示す。

#### (5) 容器破裂

圧力上昇に伴う容器等の破裂に関しては、破裂前後の圧力の違いから放出エネルギーを計算し、これと等価な TNT 火薬量 (TNT 当量) を求めて、式 20 によりある地点の爆風圧を推定することができる。破裂の際に放出されるエネルギーを求める式としては次のものがある<sup>11)</sup>。

##### ① Brode の式 (1959)

$$E = \left( \frac{P - P_0}{\gamma - 1} \right) V \quad (\text{式 29})$$

##### ② Crowl の式 (1992)

$$E = PV \left[ \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) - \left( 1 - \frac{P_0}{P} \right) \right] \quad (\text{式 30})$$

ここで、

E : 破裂により放出されるエネルギー (J)

P : 破裂前の容器内圧力 (絶対圧 : Pa)

P<sub>0</sub> : 破裂後の圧力 (=0.101 MPa=0.101×10<sup>6</sup> Pa)

V : 内容積 (m<sup>3</sup>)

γ : 容器内の気体の比熱比

例 4-6) 2012 年に岩国市で発生した製造設備の爆発事故では、緊急停止作業中に容器内の圧力が急上昇し破裂に至った。事故後の解析により破裂時の圧力は 9.6MPa (ゲージ圧) であったとされている。このときの破裂エネルギーと爆風圧。

$$P - P_0 = 9.6 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P = (9.6 + 0.101) \times 10^6 = 9.7 \times 10^6 \text{ Pa (絶対圧)}$$

$$V = 198 \text{ m}^3 \text{ (容器内の気相部)}$$

$$\gamma = 1.3$$

として、

① Brode の式 (式 29)

$$E = \left( \frac{9.6 \times 10^6}{1.3 - 1} \right) \times 198 = 6.3 \times 10^9 J = 6300 MJ$$

$$W_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{6.3 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 1500 kg$$

② Crowl の式 (式 30)

$$E = 9.7 \times 10^6 \times 198 \times \left[ \ln \left( \frac{9.7 \times 10^6}{0.1 \times 10^6} \right) - \left( 1 - \frac{0.1 \times 10^6}{9.7 \times 10^6} \right) \right]$$

$$= 6.9 \times 10^9 J = 6900 MJ$$

$$W_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{6.9 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 1600 kg$$

$W_{TNT} = 1600 kg$  として、爆風圧が 5 kPa (0.051 kgf/cm<sup>2</sup>) となる距離は、

$$\lambda = 2.4311 \times 0.051^{-0.75698} = 23.1$$

$$L = 23.1 \times \sqrt[3]{1600} = 270 m$$

また、爆風圧が 2 kPa (0.02 kgf/cm<sup>2</sup>) となる距離は、

$$\lambda = 2.7944 \times 0.02^{-0.71448} = 45.7$$

$$L = 45.7 \times \sqrt[3]{1600} = 535 m$$

例 4-7) 東日本大震災の LPG タンク爆発火災に関して、例 4-3 では蒸気雲爆発を前提として爆風圧の試算を行った。ここでは、BLEVE による LPG タンク破裂を前提として試算を行う。ただし、破裂時のタンク内圧力は不明であるため、Droste and Shoen (1988) による LPG タンク破裂の実験結果<sup>11,12)</sup>に基づき 3.9MPa (ゲージ圧) と仮定する。

$$P = (3.9 + 0.101) \times 10^6 \text{ Pa} = 4.0 \times 10^6 \text{ Pa (絶対圧)}$$

$$V = 1400 \text{ m}^3 \text{ (タンク内気相部の容積)}$$

として、式 29 (Crowl) を用いると、

$$E = 4.0 \times 10^6 \times 1400 \times \left[ \ln \left( \frac{4.0 \times 10^6}{0.1 \times 10^6} \right) - \left( 1 - \frac{0.1 \times 10^6}{4.0 \times 10^6} \right) \right]$$

$$= 1.5 \times 10^{10} J = 15000 MJ$$

$$W_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{1.5 \times 10^{10}}{4.184 \times 10^6} = 3585 kg$$



$W_{TNT}=3585\text{kg}$  として、爆風圧が  $5\text{ kPa}$  ( $0.051\text{ kgf/cm}^2$ ) となる距離は、

$$\lambda = 2.4311 \times 0.051^{-0.75698} = 23.1$$

$$L = 23.1 \times \sqrt[3]{3585} = 354\text{ m}$$

また、爆風圧が  $2\text{ kPa}$  ( $0.02\text{ kgf/cm}^2$ ) となる距離は、

$$\lambda = 2.7944 \times 0.02^{-0.71448} = 45.7$$

$$L = 45.7 \times \sqrt[3]{3585} = 700\text{ m}$$

タンクの破裂を前提とした場合、タンク気相部の容積が大きい（タンク貯蔵量が少ない）ほど爆風圧の推定値は大きくなり、蒸気雲爆発を前提とした場合と逆の傾向を示す。また、推定値は貯蔵量が相当に少ない場合を除いて、蒸気雲爆発を前提としたほうが大きくなり安全側の評価といえよう。

#### (6) 飛散物

容器の破裂による破片の飛散範囲は、破裂エネルギーのほか、破片の数、重量や形状、射出角度や初速度により異なってくる。文献 11) には飛散物に関するいくつかの推定式が示されているが、防災アセスメントのような事前評価において、これらの飛散条件を考慮して評価を行うことは事実上困難といえる。ただし、LPG 容器の BLEVE に伴う破片の飛散範囲に関しては、次のような簡易式が示されている 11)。

$$\begin{aligned} L &= 90 M^{0.333} \text{ (容積 } 5\text{m}^3 \text{ 未満の容器)} \\ &= 465 M^{0.10} \text{ (容積 } 5\text{m}^3 \text{ 以上の容器)} \end{aligned} \quad (\text{式 } 31)$$

ただし、

$L$  : 破片の最大飛散範囲(m)

$M$  : 破裂時の貯蔵物質質量(kg)

この式を東日本大震災の LPG 爆発火災 ( $M=300,000\text{kg}$ ) に適用すると次のようになる。

$$L = 465 \times 300000^{0.10} = 1640\text{m}$$

この事故では、タンク破片が最大約  $1,300\text{m}$ 、板金が最大約  $6,200\text{m}$  まで飛散している。板金は厚さ  $0.5\text{mm}$  の薄板であり、揚力によって遠方まで達したものと考えられる。一方、タンク本体の破片や付属重量物が飛散した場合には、落下・衝突による被害が懸念されるが、この事故によるタンク破片の飛散距離最大約  $1,300\text{m}$  と照らし合わせると、式 31 により大まかな推定は可能と考えられる。なお、プラントの異常反応に伴う容器破裂に関しては式 31 は適用できないため、過去の事件事例などをもとに推定することになる。

表 4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度と K 値

可燃性物質	爆発下限界	K 値									
アクリロニトリル	3.0%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	47	84	150	225	305	400	468		
アクロレイン	2.8%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～		
		K 値	51	72	130	192	270	371	510		
アセチレン	2.5%	温度 ℃	～ 10	10 ～ 40	40 ～						
		K 値	865	1210	1730						
アセトアルデヒド	4.0%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	47	66	126	182	257	374	468		
アセトン	2.5%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～		
		K 値	41	53	106	155	216	285	408		
アンモニア	15%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～				
		K 値	29	43	59	89	144				
一酸化炭素	12.5%	温度 ℃									
		K 値	240								
イソブレン	1.5%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～		
		K 値	63	132	214	295	403	598	630		
イソプロピルアルコール	2.0%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～			
		K 値	29	46	92	132	201	288			
エタン	3.0%	温度 ℃	～ -20	-20 ～ 10	10 ～ 40	40 ～					
		K 値	272	417	650	905					

表 4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度とK値（続き）

可燃性物質	爆発下限界	K 値									
エチルアミン	3.5%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	50	80	141	212	292	429	503		
エチルアルコール	3.3%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	26	44	80	115	164	218	256		
エチルエーテル	1.9%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～			
		K 値	81	179	292	422	592	810			
エチルベンゼン	0.8%	温度 ℃	～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～ 310	310 ～ 340	340 ～	
		K 値	40	59	107	158	210	266	340	396	
エチレン	2.7%	温度 ℃	～ -20	-20 ～ 10	10 ～						
		K 値	565	791	1130						
塩化エチル	3.8%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	18	38	60	85	126	171	180		
塩化ビニル	3.6%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～			
		K 値	48	60	103	150	221	238			
キシレン	1.1%*1)	温度 ℃	～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～ 310	310 ～ 340	340 ～	
		K 値	40	52	107	155	206	265	337	396	
クメン	0.9%	温度 ℃	～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～ 310	310 ～ 340	340 ～ 370	370 ～	
		K 値	59	130	218	285	367	457	552	594	
クロルメチル	8.1%	温度 ℃	～ 10	10 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～			
		K 値	22	25	41	63	81	112			

表 4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度とK 値（続き）

可燃性物質	爆発下限界	K 値									
酢酸	4.0%	温度 ℃	～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～ 310	310 ～	
		K 値	19	22	45	69	93	117	152	186	
酢酸エチル	2.0%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	22	38	67	98	137	179	224		
酢酸ビニル	2.6%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～			
		K 値	35	72	132	182	264	348			
酢酸ブチル	1.7%	温度 ℃	～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～ 310	310 ～		
		K 値	26	56	93	127	166	242	264		
酢酸メチル	3.1%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～		
		K 値	19	26	47	72	101	137	188		
酸化エチレン	3.0%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	59	70	141	224	324	461	590		
酸化プロピレン	2.3%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～		
		K 値	58	115	175	259	357	490	575		
シアン化水素	5.6%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	46	59	124	178	255	365	458		
シクロプロパン	2.4%	温度 ℃	～ 10	10 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～			
		K 値	178	276	435	603	800	888			
シクロヘキサノン	1.1%	温度 ℃	～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～			
		K 値	49	64	172	283	402	490			

表 4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度とK 値（続き）

可燃性物質	爆発下限界	K 値									
シクロヘキサン	1.3%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～	
		K 値	63	88	170	248	330	440	567	630	
シクロペンタン	1.5%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～		
		K 値	64	102	184	267	356	470	636		
ジメチルアミン	2.8%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～			
		K 値	51	118	193	281	384	511			
水素	4.0%	温度 ℃									
		K 値	2860								
スチレン	0.9%	温度 ℃	～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～ 310	310 ～ 340	340 ～ 370	370 ～
		K 値	39	47	102	145	192	243	294	338	392
トリメチルアミン	2.0%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～			
		K 値	36	91	153	211	291	364			
トルエン	1.2%	温度 ℃	～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～			
		K 値	39	82	149	232	306	392			
二塩化エチレン	6.2%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～	
		K 値	10	13	23	37	52	67	83	104	
二硫化炭素	1.3%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～
		K 値	80	119	207	294	390	495	605	755	795
ビニルアセチレン		温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	117	210	362	515	680	960	1170		

表 4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度とK値（続き）

可燃性物質	爆発下限界	K 値									
ブタジエン	2.0%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～				
		K 値	170	272	420	657	848				
ブタン・ブチ レン	1.6%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～				
		K 値	128	229	360	503	640				
ブチルアル コール	1.4%*2)	温度 ℃	～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～		
		K 値	32	41	85	136	190	272	316		
ブチルアル デヒド	1.9%	温度 ℃	～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	46	87	160	228	300	402	456		
プロパン・プ ロピレン	2.1% 2.0%	温度 ℃	～ 10	10 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～				
		K 値	178	328	497	737	888				
ブロムメチ ル	10%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～		
		K 値	7	12	23	32	42	56	68		
ヘキサン	1.1%	温度 ℃	～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～				
		K 値	65	162	356	518	648				
ベンゼン	1.2%	温度 ℃	～100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	39	78	147	217	290	364	388		
ペンタン	1.5%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～			
		K 値	65	84	240	401	550	648			
メタン	5.0%	温度 ℃	～ -80	-80 ～							
		K 値	357	714							

表 4 主な可燃性物質の爆発下限界濃度とK値（続き）

可燃性物質	爆発下限界	K 値									
メチルアルコール	6.0%	温度 ℃	～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	19	38	64	88	120	160	188		
メチルイソブチルケトン	1.2%	温度 ℃	～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～ 280	280 ～		
		K 値	46	51	121	194	263	342	463		
メチルエチルケトン	1.4%	温度 ℃	～ 100	100 ～ 130	130 ～ 160	160 ～ 190	190 ～ 220	220 ～ 250	250 ～		
		K 値	36	61	115	165	222	295	360		
メチルエーテル	3.4%	温度 ℃	～ 10	10 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～			
		K 値	109	125	229	327	483	544			
モノメチルアミン	4.9%	温度 ℃	～ 10	10 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～			
		K 値	91	105	192	274	366	456			
硫化水素	4.0%	温度 ℃	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～					
		K 値	158	221	304	525					

注 1) 爆発下限界は例えば文献 13)、14) などによる。他の物質についてはこれらを参照されたい。

注 2) K 値は高圧ガス保安法・コンビナート等保安規則（別表ニ）による。ただし、同法では上記の値に 1000 を乗じたものを K 値とし、ガス流出量を ton で表わしている。なお、上記以外のガスの K 値は、次式によるものとしている。

$$K=4.1(T-T_0)\times 10^3$$

ただし、T：当該ガスの常用の温度（℃）、T<sub>0</sub>：当該ガスの大気圧における沸点（℃）

注 3) \*1) m-キシレン、p-キシレンの値    \*2) 1-ブタノールの値

## 参考資料2 参考文献

- 1) 佐藤公雄：揮発性液体の風による蒸発，安全工学，Vol.18，No.2，1979
- 2) 坂上治郎：坂上式の拡散パラメータと二,三の計算式について，高圧ガス，Vol.19，No.4，1982
- 3) CCPS AIChE：Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis，2000
- 4) 石油コンビナート防災診断委員会：石油コンビナート災害想定の手法(消防地第 180 号)，1980
- 5) 湯本太郎他：大規模石油火災からの放射熱の推定，安全工学，Vol.21，No.4，1982
- 6) 石油タンク等の災害想定について，石油公団・危険物保安技術協会，2002
- 7) 安全工学協会編：安全工学講座 2・爆発，1983
- 8) コスモ石油事故調査委員会：千葉製油所液化石油ガス出荷装置及び貯槽設備火災・爆発事故調査報告書，2011
- 9) 土橋律，川村智史，桑名一徳，中山良男：ガス爆発時の爆風圧の影響度評価，安全工学セミナー講演予稿集，2009
- 10) 高圧ガス保安協会：コンビナート保安・防災技術指針，1974
- 11) CCPS AIChE：Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition，2010
- 12) Droste, B., and W. Shoen. 1988. Full-scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks. *J. Haz. Mat.* 20:41-53
- 13) 日本化学会編：化学防災指針集成，丸善，1996
- 14) 中央労働災害防止協会：新版 危険・有害物便覧，1988



### 参考資料 3 スロッシングによる溢流量の計算

### 参考資料3 スロッシングによる溢流量の計算

危険物タンクのスロッシング最大波高の推定には、速度応答スペクトル法<sup>1)</sup>がよく用いられ、観測値との整合性がよいことが確認されている。ただし、速度応答スペクトル法は微小波高を仮定したものであり、溢流が生じるような大きなスロッシングの場合には、非線形性の影響を考慮する必要がある。西ら<sup>2)</sup>は、振動台による模型タンクの揺動実験を行い、速度応答スペクトル法による線形解に非線形性を考慮した補正値を導入し、溢流高さと溢流量の関係を実験的に求めている。

#### 1. スロッシングの非線形性を考慮した最大波高の推定

非線形性を考慮したスロッシング最大波高は、式(1)により表される。

$$\eta^+ = \eta^{(1)\max} + \Delta\eta \quad \dots\dots\dots(1)$$

$\eta^+$  : 非線形性を考慮したスロッシング最大波高

$\eta^{(1)\max}$  : 速度応答スペクトル法に基づくスロッシング最大波高(線形解)

$\Delta\eta$  : 非線形液面増分

$\Delta\eta$  は、直径 7.6m の模型タンクによる振動実験に基づき、式(2)のように表される。

$$\Delta\eta = 0.91 \cdot R \cdot \left( \frac{\eta^{(1)\max}}{R} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

R : タンク半径

#### 2. 溢流量の推定

非線形性を考慮したスロッシング最大波高( $\eta^+$ )とタンクの側板高さとの差を溢流高さ( $\delta h$ )、スロッシングによる液面減少高さ(溢流により減少した液レベル)を $\Delta$ とする。溢流体積( $\delta v$ )が式(3)で表されるとすると、 $\Delta$ 、 $\delta v$ 、 $\delta h$ は式(4)で表される関係がある。ここで、 $r_0$ は式(5)において $\eta^+(r_0, 0) = H_c$ を解いて求められ、 $\theta_0$ は式(5)において $\eta^+(R, \theta_0) = H_c$ を解いて求められる。

$$\delta v = \delta h \cdot (R - r_0) \cdot R \theta_0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$\delta v$  : 溢流体積(図1の斜線で示す部分)

$\delta h$  : 溢流高さ

$r_0$  : タンク側板高さにおける $\theta = 0^\circ$ の半径との交点

$\theta_0$  : 側板近傍においてスロッシング波高が $H_c$ と等しくなる円周方向角度

$$\frac{\Delta}{R} = \alpha \cdot \frac{\delta v}{R^3} = \alpha \cdot \frac{\delta h}{R} \cdot \frac{R - r_0}{R} \cdot \theta_0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$\alpha$  : 比例係数(自由液面 : 0.659、浮屋根 : 0.4023)

$$\eta^+(r, \theta) = \eta_{\max}^{(1)} \cdot \frac{J_1(\varepsilon_1 \cdot \frac{r}{R})}{J_1(\varepsilon_1)} \cdot \cos \theta + \frac{r}{R} \cdot \Delta \eta \cdot \cos 2\theta \cdots \cdots (5)$$

$J_1$  : 第1種ベッセル関数(1次)

$\varepsilon_1$  :  $J_1$  の  $dJ_1(x)/dx=0$  の1番目の正根 (=1.84118)

従って、溢流量の推定値は式(6)により求められる。

$$\begin{aligned} \Delta v &= (R^2 \pi) \cdot \Delta \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta v / R^2) \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0 / R) \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

$\Delta$  : スロッシングによる液面減少高さ

$\alpha$  : 0.4023 (浮屋根)

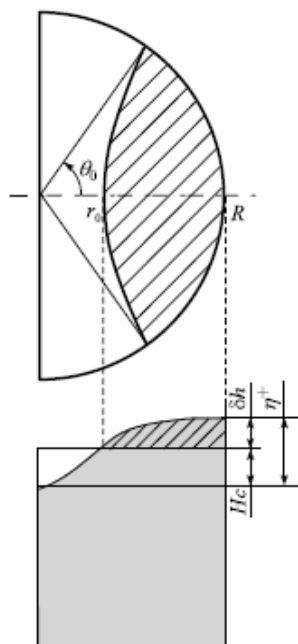


図1 非線形スロッシングによる溢流量の模式図<sup>2)</sup>

西らは、これらの結果について過去の地震による実際の溢流量との比較検証を行い、2003年十勝沖地震に対して十分な適用性があることを確認している。

### 参考資料3 参考文献

- 1) 坂井藤一：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二,三の提案, 圧力技術, Vol18, No.4, 1980
- 2) 西晴樹、山田實、座間信作、御子柴正、箕輪親宏：石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定, 圧力技術, Vol.46, No.5, 2008

## 参考資料 4 危険物タンクの津波被害シミュレーション ツール

## 参考資料 4 危険物タンクの津波被害シミュレーションツール

### 1. 危険物タンクの津波被害シミュレーションツールの提供

東日本大震災では、沿岸に立地する危険物タンクにおいて津波浸水被害が数多く発生した。これらの被害事例に関する詳細分析の結果、既往の津波波力による被害予測式<sup>1)</sup>の有効性が確認されたことから<sup>2)</sup>、消防庁ではこの予測式を用いた津波被害シミュレーションツールを開発・提供することとし、津波により浸水の恐れがある危険物タンクについては、具体的な被害予測に基づく津波対策を検証し、予防規程に盛り込むこととされた。このシミュレーションツールは、消防庁の以下のホームページからダウンロードすることができる。

#### ■屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール

<http://www.fdma.go.jp/concern/publication/simulatetool/index.html>

### 2. 危険物タンクの津波浸水被害状況と浸水による被害予測式

以降は、消防庁消防大学校消防研究センター畑山健氏の提供による「第 15 回消防防災研究講演会資料」<sup>3)</sup>の一部を抜粋・編集したものである。

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)では、各地に大きな津波が押し寄せ、沿岸部に立地していた大小多数の石油タンク（屋外タンク貯蔵所）に、甚大な被害が発生した。この津波被害の実態を明らかにするため、消防研究センターでは現地調査を行った。また、消防庁危険物保安室では消防本部を通じた事業者へのアンケート調査により、被害状況を調べるとともに、津波浸水深と被害発生状況の関係を整理し、今後の被害予防軽減対策を提案している<sup>2)</sup>。この津波浸水深と石油タンクの被害発生状況の関係の整理は、これまでに例のないものと思われる。

消防庁危険物保安室では、2004 年インドネシア・スマトラ島沖地震（Mw9.1）に伴って発生した津波により、スマトラ島北西端のバンダアチェ市近郊で石油タンクが流される被害が発生したことを受け、平成 18 年度（2006 年度）から平成 20 年度（2008 年度）の 3 年間にわたって「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討会」（以下「平成 20 年度までの調査検討会」という。）を開催し、石油タンクの津波対策を研究した。この調査検討の一応の成果として、「屋外タンク貯蔵所の周囲における津波被害予防・軽減対策の検討フロー」が例示され、そこでの検討において利用可能なツールとして、津波を受けた石油タンクに滑動、転倒、浮き上がりなどの被害が発生するおそれの有無を評価する方法が提案された<sup>1,4)</sup>。危険物保安室では、ここで提案されている被害発生評価方法による予測結果と、今回の震災による実被害の発生状況を照合し、その有効性の検証も行った。

本稿では、上述の調査結果に基づく津波浸水深と石油タンクへの被害の発生状況の関係、平成 20 年度までの調査検討会で提案された被害発生評価方法の有効性の検証結果について述べる。

### (1) 津波浸水深と石油タンクへの被害の発生状況の関係

危険物保安室では、同庁開催の「東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会」における取組の一環として、津波浸水深と石油タンクへの被害の発生状況の関係を把握することを目的に、岩手県及び宮城県の沿岸部の一部の地域を対象とした詳細なアンケート調査を行った。調査対象には、津波で被害を受けなかった屋外タンク貯蔵所も含められた。調査項目は、タンク本体の移動・損傷の有無、配管の移動・損傷の有無、タンク諸元（自重を含む）、地震発生時の貯油量と内容液の比重、タンクが受けた津波の浸水深などである。この結果、244基分のデータが集まった。

これら 244 基のうち、①「タンク本体にも付属配管にも被害がなかったもの」は 116 基、②「タンク本体には被害はなかったものの付属配管には被害があったもの」は 60 基、③「タンク本体と付属配管ともに被害があったもの」は 68 基であった。

図 1 は、タンクが受けた津波の浸水深とタンクの許可容量に対して、①から③の被害発生状況をプロットしたものである。この図で、「タンクなし、配管なし」は①、「タンクなし、配管あり」は②、「タンクあり、配管あり」は③を意味する。おおまかな傾向として、浸水深が 3m 未満では、タンクにも配管にも被害は発生していないが、浸水深が 3m 以上になると被害が発生するようになることがわかる。さらに、浸水深が 3～5m では、タンク本体には被害はなかったものの付属配管には被害が発生したものと、タンク本体と付属配管ともに被害があったものの両方があるのに対し、浸水深が 5m 以上となると、ほとんどの屋外タンク貯蔵所で被害は配管のみにとどまらずタンク本体にも及んでいることがわかる。

図 2 から図 6 は浸水深のクラス別に、許可容量と地震発生時の貯油量に対して①から③の被害発生状況をプロットしたものである。図 2 と図 3 は、浸水深が 3m 未満の場合には、ごく容量の小さなタンクを除けば、貯油量に関係なく、タンク本体にも付属配管にも被害がなかったことを示している。図 4 からは、浸水深が 3～5m になると、前述のとおりタンク本体には被害はなかったものの付属配管には被害が発生した屋外タンク貯蔵所と、タンク本体と付属配管ともに被害があったものの両方あることがわかるが、さらにこの図はタンク本体と付属配管ともに被害があった屋外タンク貯蔵所は、容量が小さくかつ貯油量も少なかった（ほぼ空の状態であった）ことも示している。図 5 と図 6 からは、浸水深が 5m を超えると、特定屋外タンク貯蔵所クラスの大きさのものを含めほとんどの屋外タンク貯蔵所において、タンクが空に近い状態でなかったとしてもタンク本体に被害が発生していることが読み取れる。本体が被害を受けたタンクのなかには、許可容量約 6 千 kL で貯油率が約 20%だったもの、許可容量約 3 千 kL で貯油率が 50%強だったもの、許可容量約 1 千 kL でほぼ満液だったものがある。

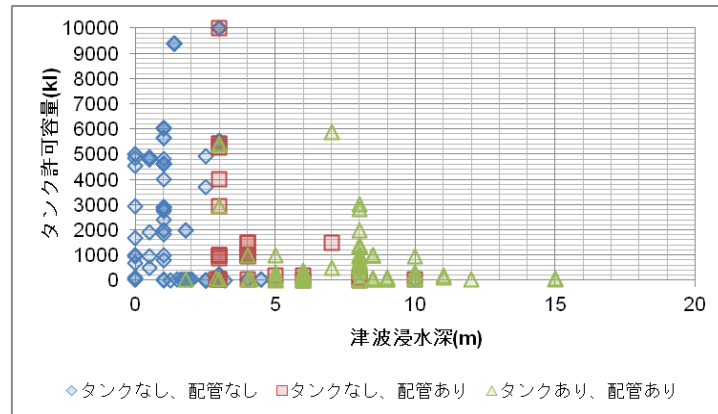


図 1 津波浸水深と許可容量に対する被害発生状況

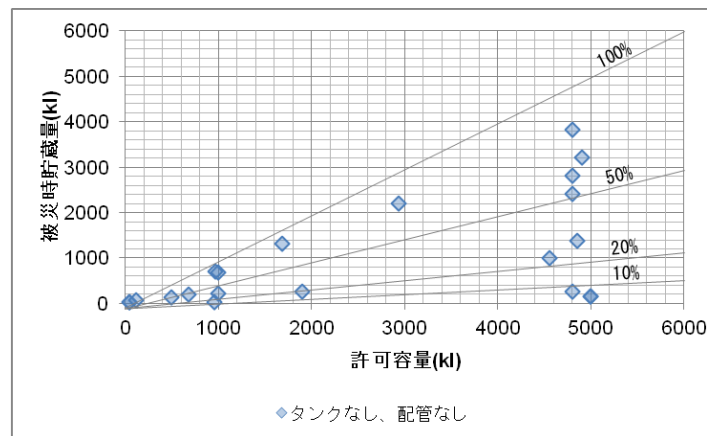


図 2 許可容量と貯油量に対する被害発生状況（浸水深<1 m）

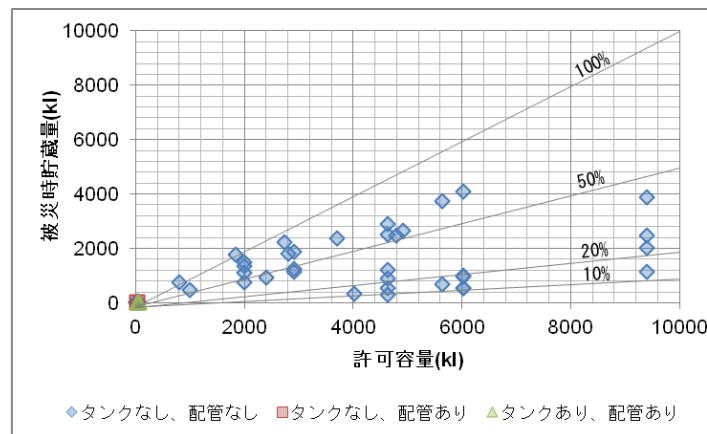


図 3 許可容量と貯油量に対する被害発生状況（1m≤浸水深<3m）



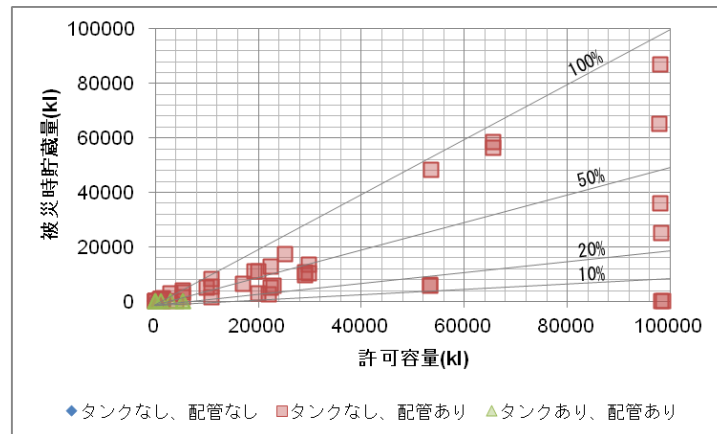


図 4 許可容量と貯油量に対する被害発生状況 (3m ≤ 浸水深 < 5m)

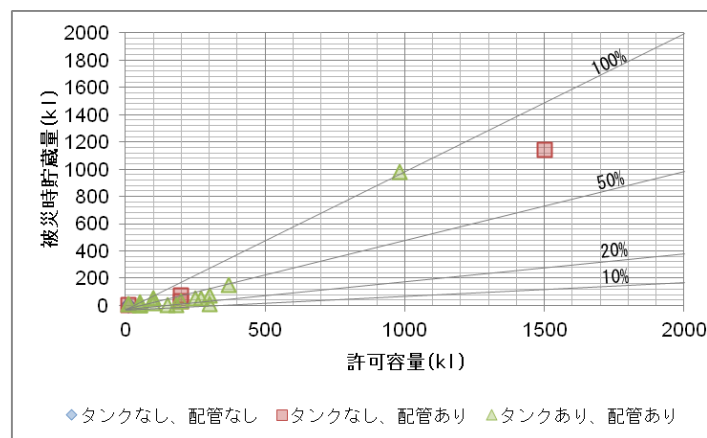


図 5 許可容量と貯油量に対する被害発生状況 (5m ≤ 浸水深 < 7m)

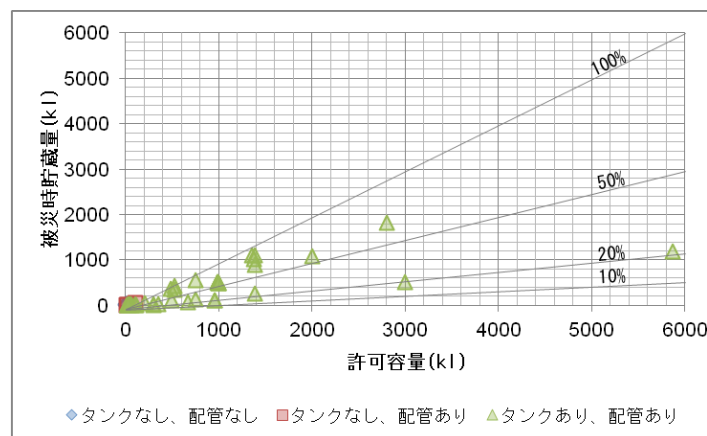


図 6 許可容量と貯油量に対する被害発生状況 (7m < 浸水深)

## (2) 被害発生予測提案式の有効性の検証

平成 20 年度までの調査検討会の報告書では、円筒縦置き型タンクが津波を受けた時に発生するおそれのある被害形態には図 7 に示すようなものが考えられるとして、これらのうち、浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧差による側板座屈について、その発生のおそれを評価するための方法が提案されている。例えば、滑動について方法は(1)式で表現される。ここに、 $F_{sb}$  は滑動安全率

で、1 以下だと滑動のおそれあり、1 を超えるとおそれなしと評価される指標である。 $\mu$ 、 $W_T$ 、 $W_L$ 、 $F_{iH}$ 、 $F_{iV}$  は、それぞれタンク基礎とタンク本体の摩擦係数、タンク自重、タンク内溶液の重量、タンクに作用する津波による水平力、タンクに作用する津波による鉛直力である。

$$F_{sb} = \frac{\mu(W_T + W_L - F_{iV})}{F_{iH}} \quad (1)$$

タンクに作用する津波による水平力及び鉛直力を計算する式として、それぞれ次のものが提案された。これらの式は水理模型実験<sup>6)</sup>に基づいて得られたものである。

$$F_{iH} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g \left[ \alpha \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos(m\theta) \right]^2 R \cos \theta d\theta$$

$$p_0 = 0.680$$

$$p_1 = 0.340$$

$$p_2 = 0.015$$

$$p_3 = -0.035 \quad (2)$$

$$F_{iV} = 2 \int_0^{\pi} \rho g \left[ \beta \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 q_m \cos(m\theta) \right] R^2 \cos^2 \theta d\theta$$

$$q_0 = 0.720$$

$$q_1 = 0.308$$

$$q_2 = 0.014$$

$$q_3 = -0.042 \quad (3)$$

上式で、 $\rho$  と  $g$  は海水の密度と重力加速度、 $\eta_{\max}$  は浸水深である。 $\alpha$  と  $\beta$  は浸水深と津波の流速に関係するフルード数によって設定される係数で、大きなフルード数、すなわち大きな流速に対して大きな値をとるよう設定される。 $\alpha$  は 1 から 1.8、 $\beta$  は 1 から 1.2 の値をとる。フルード数が 0.9 以下の場合には一定値 1 とされる。

図 8 は、浮き上がり、滑動、転倒、内外水圧差による側板座屈の発生可能性を評価する提案式を用いて、代表的と考えられる諸元を有する容量 1 千 kL のタンクと容量 1 万 kL のタンクにおける被害発生のおそれを貯油率と浸水深に対して評価した結果である。この図は、各線を上回る浸水深があれば、その線に対応する被害形態が発生するおそれがあることを意味している。容量 1 千 kL のタンクでも、容量 1 万 kL のタンクでも、貯油率によらず、滑動が最も小さな浸水深で発生するおそれが生ずるという結果である。このことから、津波の到来時においては、タンクではまずもって滑動が生じるおそれが高いものと考えられた。

危険物保安室では、「(1) 津波浸水深と石油タンクへの被害の発生状況の関係」において述べた調査でデータが集まったタンクに対して、(1)式により滑動発生のおそれを評価し、その結果と実際の被害状況を比較した。図 9 は、実際に移動の被害が発生したタンク本体に対して滑動発生

おそれを評価した結果である。実際に移動の被害が発生したタンク 68 基のうち、滑動発生のおそれありと評価されたものは 62 基であり、約 90%のタンクで的中している。図 10 は実際には移動の被害が発生しなかったタンク本体に対する評価結果である。実際には移動の被害は発生しなかったタンク 176 基のうち、滑動発生のおそれなしと評価されたものは 138 基であり、約 80%のタンクで的中している。実際に移動の被害が発生したタンクと発生しなかったものを合わせた 244 基のうちの 200 基で、(1)式による評価結果と実際の被害状況が一致しており、的中率は約 80%である。実際に移動の被害が発生したにもかかわらず、滑動発生のおそれなしと評価されたタンクは 6 基であるのに対して、その逆、すなわち、実際には移動の被害は発生しなかったにもかかわらず、滑動発生のおそれありと評価されたタンクは 38 基ある。したがって、(1)の評価式は被害発生のおそれをやや過大に評価するもの、すなわち安全側の評価を与える傾向を有するといえる。

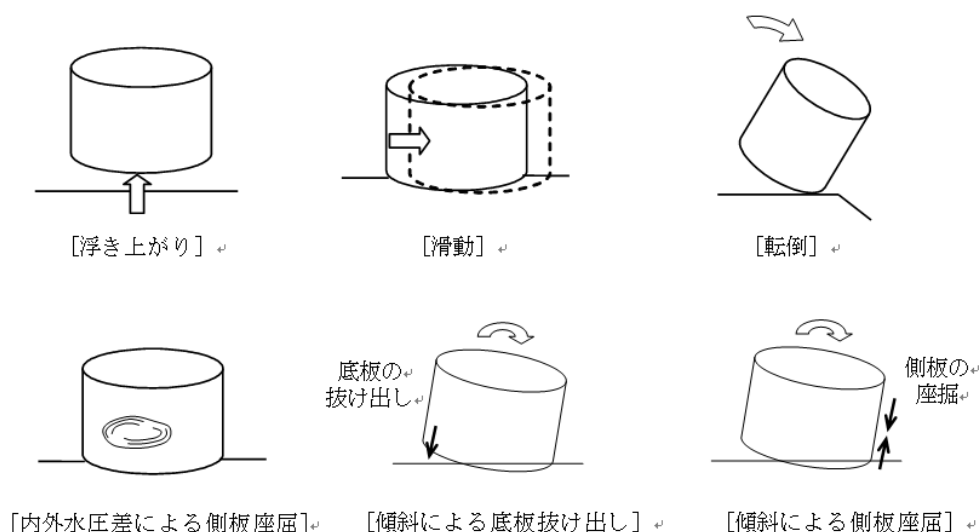


図 7 津波を受けたタンクに発生するおそれのあるものとして考えられた被害形態

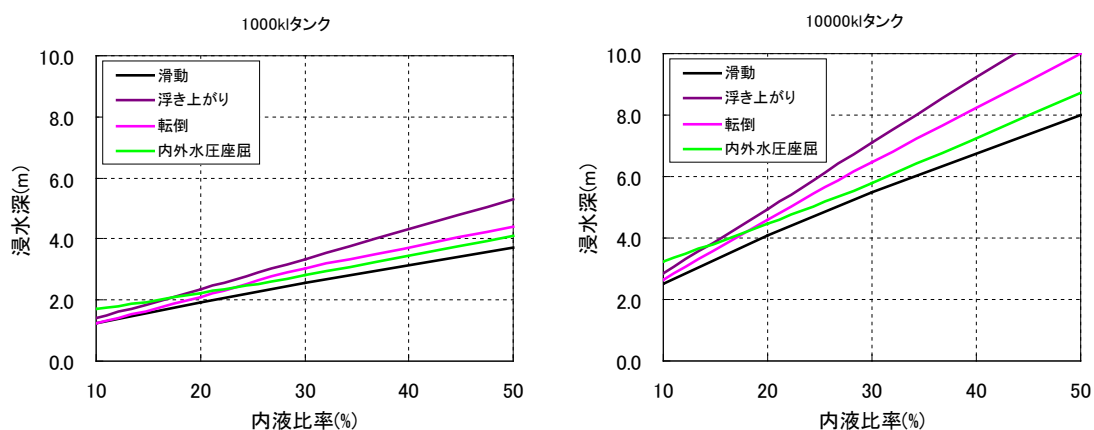


図 8 代表的と考えられる諸元を有するタンクに対する被害発生のおそれの評価結果

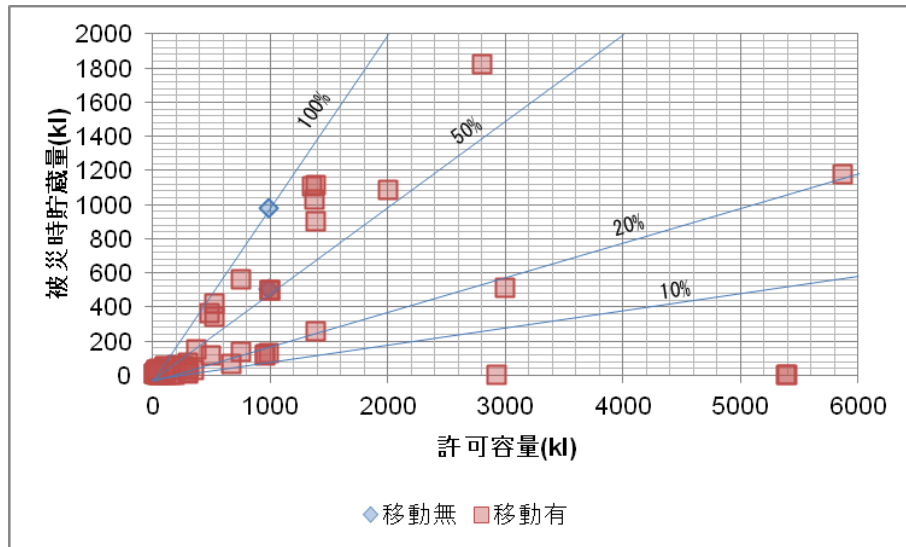


図 9 実際に移動の被害が発生したタンク本体に対する滑動発生のおそれの評価結果

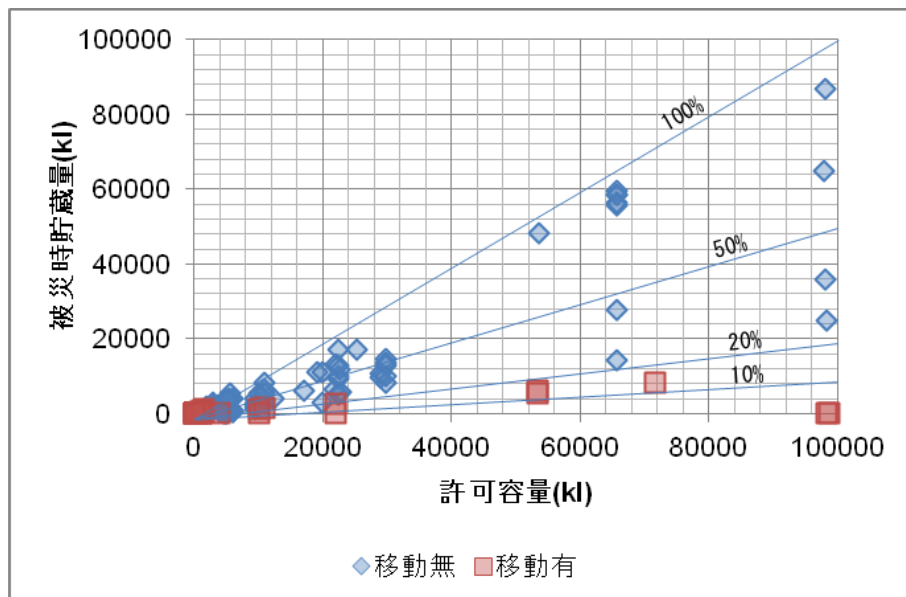


図 10 実際には移動の被害が発生しなかったタンク本体に対する滑動発生のおそれの評価結果

以上より、タンク本体に滑動が発生するおそれの評価するものとして平成 20 年度までの調査検討会で提案された方法は、有効性の高いものであることがわかった。本方法は屋外貯蔵タンクの移動の被害を予測するツールとして、今後の利活用が期待できる。

この結果を受け、危険物保安室では「屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール」を開発・提供することとし、屋外タンク貯蔵所の具体的な津波被害予測に活用することとしている。

#### 参考資料 4 参考文献

- 1) 総務省消防庁：危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書， 2009
- 2) 消防庁危険物保安室・特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書, 2011
- 3) 畑山健：石油タンクの津波被害について，第 15 回消防防災講演会資料, 2012
- 4) 稲垣聡・池谷毅・大森政則・藤井直樹・向原健・畑山健：津波による屋外タンクの滑動・漂流実験および予測手法の提案，海岸工学論文集（土木学会），Vol55， 2008
- 5) 消防庁消防研究センター：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の被害および消防活動に関する調査報告書（第1報）， 2011
- 6) 東電設計株式会社：津波による石油タンクの被害予測手法に関する研究，平成 16 年度消防防災科学技術研究推進制度， 2005