

4 災害想定

4-1 石油コンビナートの防災アセスメント指針（抜粋）（消防庁特殊災害室 平成 25 年版）

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（強震動及び液化化）、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。

$$R = \sum F_i \cdot C_i$$

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
- 5×10^{-3} ：確率 → 200 回に 1 回発生
頻度 → 200 年に 1 回発生
- 2×10^{-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。

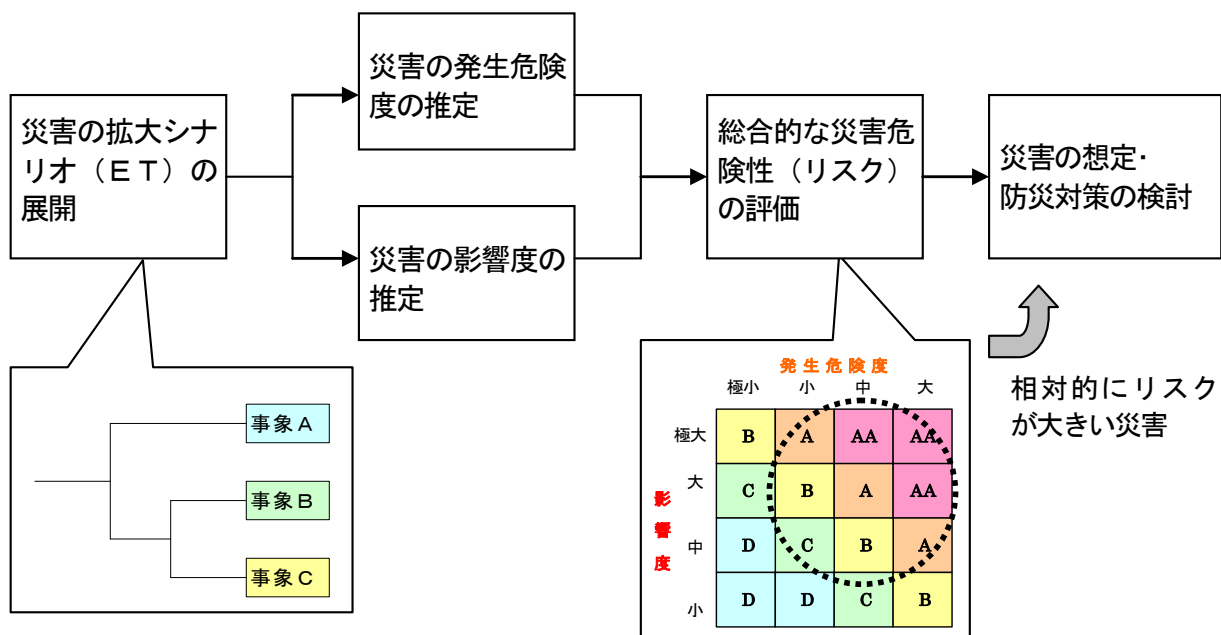


図 2.1 防災アセスメントにおけるリスク評価の基本概念

(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。

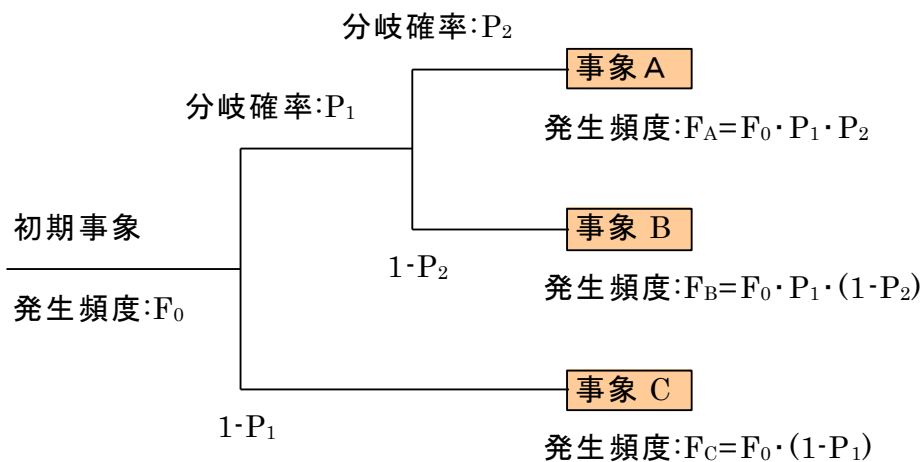


図 2.2 イベントツリーの概念図

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。

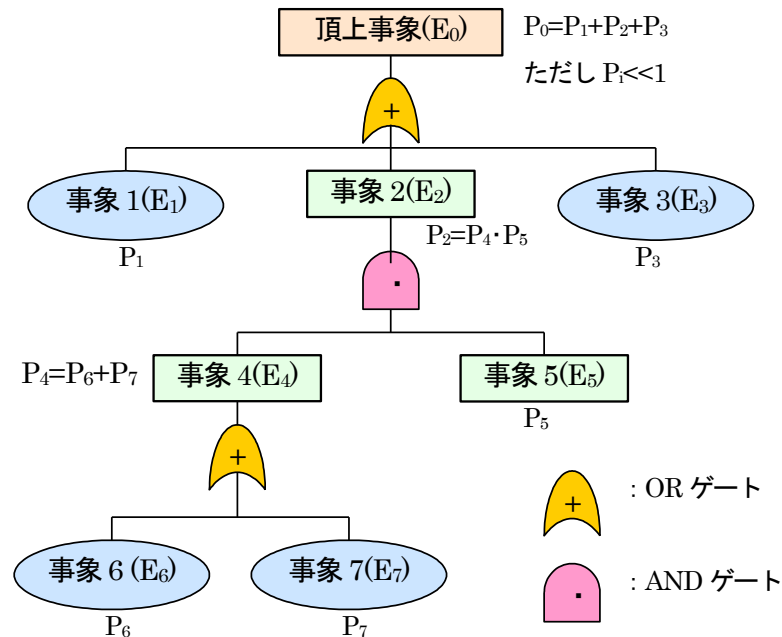


図 2.3 フォールトツリーの概念図

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 2×10^{-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

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

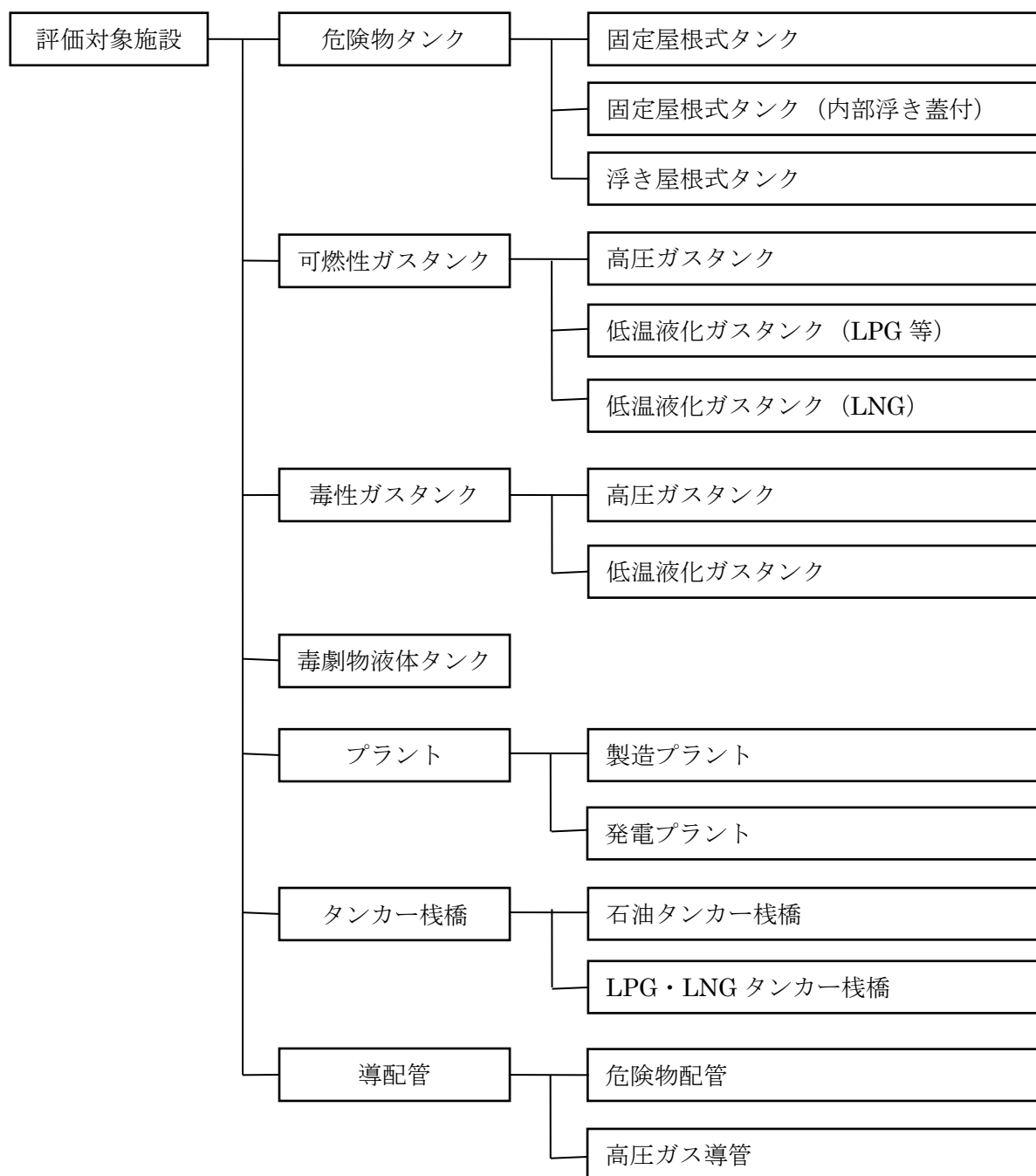
地震時の防災アセスメントを行う場合には、地震に対する施設の脆弱性を考慮する必要がある。例えば、兵庫県南部地震で比較的地震に弱いとされた 500 kℓ以上 1,000 kℓ未満の屋外タンク貯蔵所（準特定タンクで特に平成 11 年の新基準に適合していないもの）などは評価対象とすべきである。施設数が多い場合には、火災になりやすい低引火点の危険物、あるいは毒性の強い危険物を貯蔵したものを選定する（屋外タンク貯蔵所は以下「危険物タンク」と呼ぶ）。

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¹⁾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
長周期地震動	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
	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。

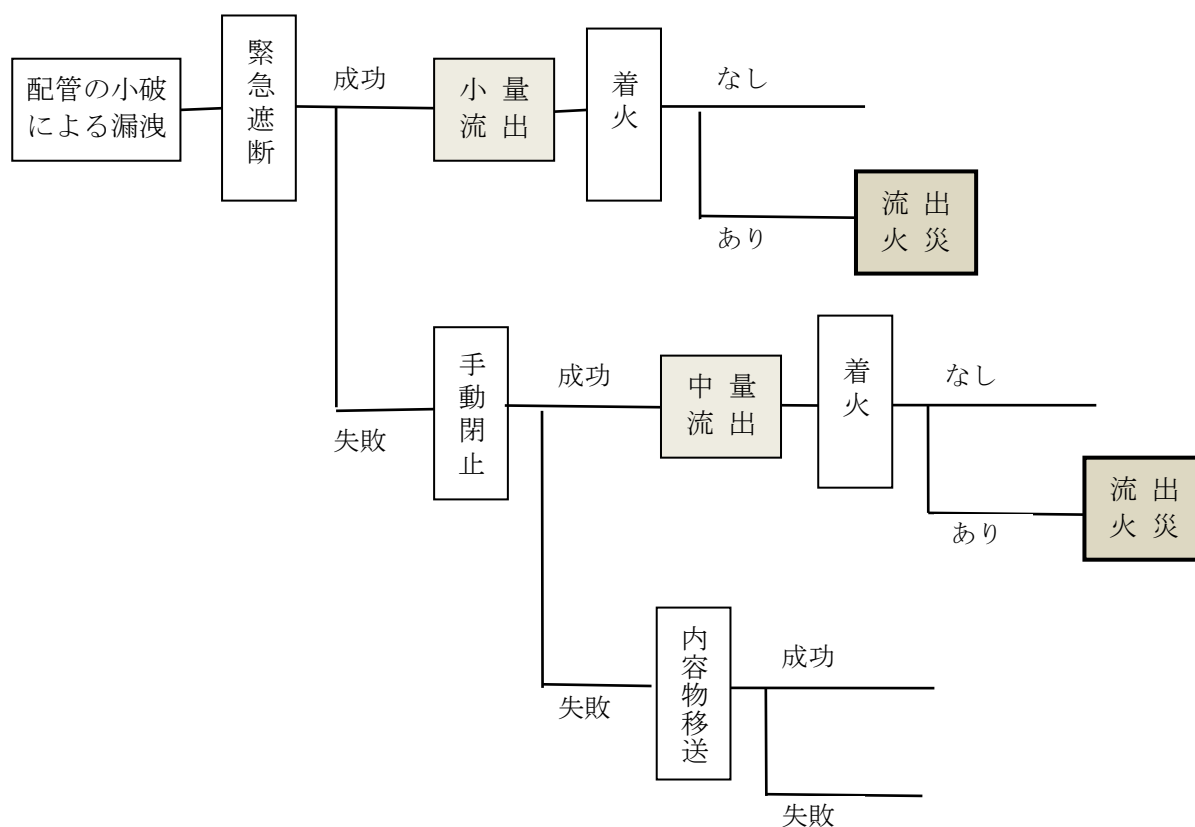


図 4.1 イベントツリー展開の概念図

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で表しているが、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）

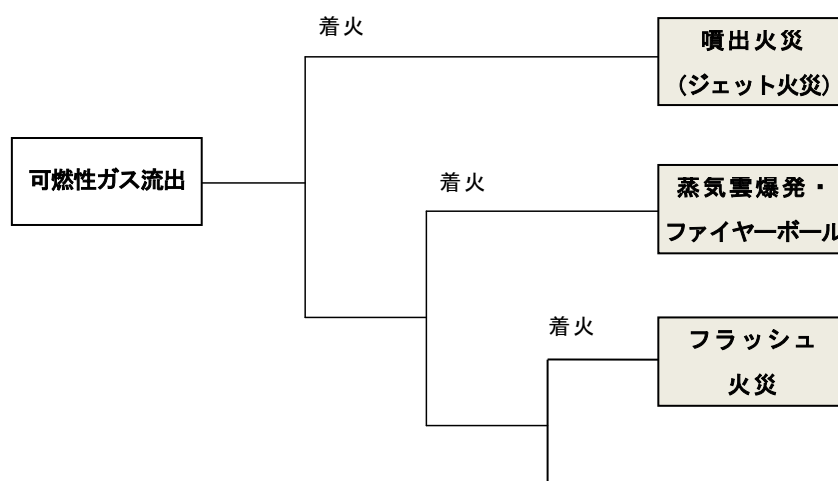


図 4.2 可燃性ガスの燃焼形態

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、作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で表すが、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、また高圧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）

4-2 コンビナート保安・防災技術指針（高圧ガス保安協会）

1. 漏洩物質の拡散

(1) 漏洩と拡散

コンビナートに存在する工場プラントには各種の危険、有害物資を内蔵する装置、施設が多くこれらの施設が平常時或いは地震発生時に何らかの破損を生じる、内容物の漏出が起き、内容物の種類及びその存在状態によっては、次の表のような状況になると考えられる。

貯蔵状態によるガスの漏えい状況

	温度	圧力	相	漏えいの状況	例
1	常温	常圧	液	流出：液体として拡がり防液堤内に溜る。	液体貯槽 (原油など)
2	常温 (破壊口が気相部)	加圧	気	噴出：ボンベは脱圧してとまる。液化ガスの場合は液相の消失か液温が沸点に下って止まる。	水素ボンベ、 液化ガス貯槽（L P G、塩素など）
3	常温 (破壊口が液相部)	加圧	液	噴出：液は脱圧により急激に気化し、気化熱を奪われ沸点に下る。気化量大なら噴霧。	液化ガス貯槽 反応槽、送液管など
4	低温	常圧	液	流出：はじめ地表と熱交換し大量に気化、漸次蒸発量下り、低温液体が防液堤内に留る。	液化ガス低温貯槽
5	高温	加圧	気 液	噴出：多くの場合着火し噴炎となる。	加熱炉・分解炉など

(2) 流出

液体、気体の破壊口からの流出は、流体の各種の物性値と破壊口の形状、位置、加圧の状況など複雑な要素の組み合わせを必要とするが、一般的にコンビナート工場で扱っている物資の流出は次の計算式による。

$$\text{液体の流出式} \quad Q = C_1 \cdot C_2 \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot h}$$

Q : 流出量 (m³/sec)

C₁ : 流出係数

C₂ : ノズル係数

a : 流出口面積 (m²)

g : 重量の加速度 (9.8m/sec²)

h : 流出圧力 (液面高さ) (m)

$$\text{気体の流出式} \quad W = 548 \cdot a \cdot K \cdot P_1 \left(\sqrt{\frac{M}{ZT}} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{k}{k-1} \right) \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\}}$$

W : 流出量 (kg/hr)

a : 流出口面積 (cm²)

K : 流出係数

P₁ : 初圧 P₂ : 終圧 (kg/cm² abs)

K : 断熱指数

Z : 圧縮係数

M : ガスの分子量

T : 流出時の温度 (°K)

(3) 液面の拡大

流出した液体の地表または水面での拡大にも実際の様相を考慮する精密な解析はまだ得られていない。そこで最も単純な全く水平で凸凹のない面上に液が流出した場合について求められた次式で液面の拡大を求める。

$$\text{初期の液面拡大} \quad R(t) = \sqrt{2 \sqrt{\frac{gV}{\pi}} \cdot t + R_0^2}$$

R_0 : はじめの液面半径 (m)

V : t 秒までの流出全量 (m^3)

t : 液面半径が $R(t)$ になる時間 (sec)

g : 重量加速度 9.8 (m/sec^2)

$$\text{時間の経過した後の拡大} \quad R(t) = \left(\frac{16gV^3}{\pi^3 C^2 \nu} t + R_0^8 \right)^{1/8}$$

R_0 : V, t, g は初期液面拡大の記号と同一

C : 速度勾配係数 0.1 とする

ν : 動粘度 (ストークス) ($10^{-4} \text{ m}^2 / \text{sec}$)

(4) 気体の拡散

気体の拡散は、加圧気体の噴出、常温加圧の流出に伴う急激な気化、低温液体の流出後の蒸発の三つの要素が想定される。コンビナート地区で気体の拡散を考える場合、多くの障害物や熱対流を持つ装置の林立する地域では、その拡散の状態を一般的に一定の式で表すことは難しいが、次の三つの式で示す。

連続点源よりの気体の拡散式

$$C = \frac{q}{u} \cdot \frac{e^{-\frac{Q^2}{A}}}{\sqrt{A\pi}} \cdot \frac{1}{B} e^{-\frac{h+Z}{B}} \cdot J_0 \left(i \frac{2\sqrt{h \cdot Z}}{B} \right)$$

$$A = \frac{1}{(3.03)^2} qA(\phi AX + e^{-\phi AX} - 1)$$

$$B = qB(\phi BX + e^{-\phi BX} - 1)$$

C : X, Y, Z 地点の濃度 (m^3 / m^3)

q : 点源からの発生量 (m^3 / sec)

u : 風速 (m / sec)

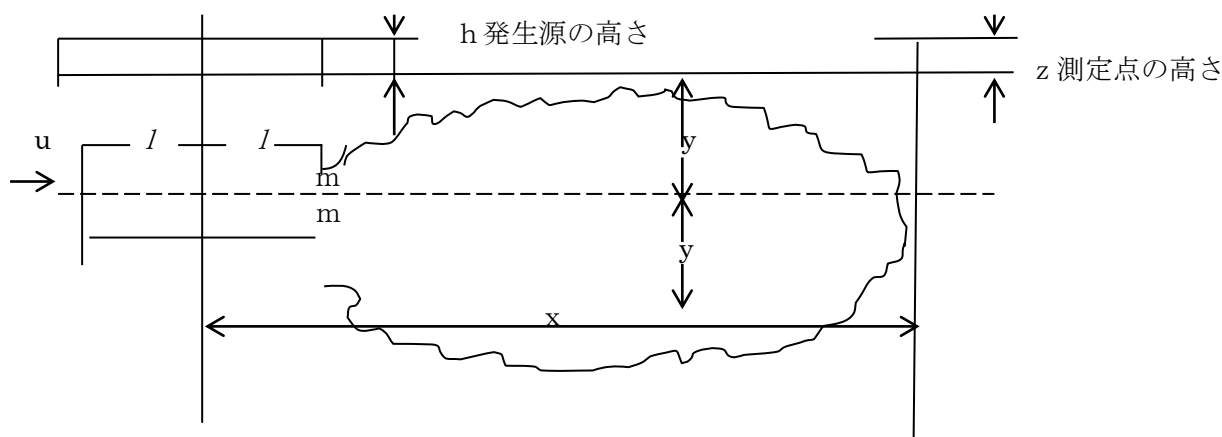
h : 発生源の高さ (m)

連続面源よりの気体の拡散式

$$C = \frac{q}{u} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{B}}}{2} \cdot \frac{\sqrt{A}}{2} \left[\Lambda \left(\frac{x+1}{\sqrt{A}} \right) \right] \cdot \frac{\text{erf} \left(\frac{y+m}{\sqrt{A}} \right) - \text{erf} \left(\frac{y-m}{\sqrt{A}} \right)}{2}$$

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

C, q, u 及び A, B は連続点源の式の記号と同様とし、 X, Y, Z, l, m は次図に示す位置のとおりである。



瞬間面源よりの気体の拡散式

$$C = \frac{q_i}{u} \cdot \frac{e^{-Z/B}}{B} \cdot \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x-ut+l}{\sqrt{A}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-ut-l}{\sqrt{A}}\right)}{2} \cdot \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{y+m}{\sqrt{A}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-m}{\sqrt{A}}\right)}{2}$$

q_i : 瞬間発生量 ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ sec}$)
 t : 経過時間 (sec)

2. 火災・爆発による影響範囲

(1) プール火災による影響範囲

プール火災による影響は火災からのふく射熱によるものとする。

火災から任意の位置にある点の受けるふく射熱 E は、

$$E = \phi Rf$$

で求められる。ここに ϕ は形態係数、 Rf は火災のふく射発散度である。主な燃料 Rf は、次表に与えられる。

主な燃料のふく射発散度

燃 料	幅射発散度 ($\text{Kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)
カ フ ジ 原 油	35×10^3
ガ ソ リ ン ・ ナ フ サ	50×10^3
灯 油	43×10^3
軽 油	36×10^3
重 油	20×10^3
ベ ン ゼ ン	53×10^3
n - ヘ キ サ ン	73×10^3
メ タ ノ ー ル	84×10^3
エ タ ノ ー ル	10×10^3
L N G	65×10^3
エ チ レ ン	115×10^3
プ ロ パ ン	64×10^3
プ ロ ピ レ ン	63×10^3
n - ブ タ ン	71×10^3

また無風時を考え、火災を直立円筒とし、受熱面を火災の基部と同じ高さとする、形態係数 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{Y^2 - 1}} \right) + \frac{X}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2Y)}{Y \sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A(Y-1)}{B(Y+1)}} - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(Y-1)}{(Y+1)}} \right\}$$

ただし、 $X = H/R$ 、 $Y = L/R$ 、 $A = (1 + Y)^2 + X^2$ 、 $B = (1 + Y)^2 + X^2$
 H は火災の高さ、 R は火災の半径、そして L は火災の中心から受熱面までの距離である。

輻 射 強 度 の 表

強 度 の 項 目	kcal／m ² hr
人が長期間曝露されて安全な強度	1, 080
10～20 秒で苦痛を感じずる強度	4, 000
10～20 秒で火傷となる強度	7, 000
約 15 分間に木材繊維などの発火する強度	10, 000～20, 000

(2) 爆風圧による被害

爆風圧による被害については、建物や工作物に対するものと人体に対するものがあるが、爆風圧と被害との関係は次のとおりである。

爆風圧と被害の基準

窓ガラス	こわれることあり おおむね破損	0. 04kg／c m ² 0. 4
木造建物	小破 半壊 倒壊	0. 25 0. 6 1. 5
鉄骨塔	倒壊	0. 6
L P G タンク	小破 破壊	0. 6 2. 6
石油タンク	小破 大破	0. 23 0. 37
人体	鼓膜破れることあり 肺破れることあり 死亡	0. 21 0. 42 4. 2

4-3 油の海上流出

風・海潮流による排出油の移動距離表（排出点：第二海堡付近）

パターン	経過時間	風				海 潮 流				合計移動距離(m)	
		6 時間ごとの 移動距離 (m)		小 計 (m)		6 時間ごとの 移動距離 (m)		小 計 (m)			
A 風 5 m/s 北 潮流 1.5 ノット 下げ潮初期	6	南	4,320	南	4,320	南東・南	11,668	南東・南	11,668	南	15,100
	12	南	4,320	南	8,640	北・北東	11,668		0	南	8,350
	18	南	4,320	南	12,960	南	11,668	南	11,668	南	23,300
	24	南	4,320	南	17,280	北	11,668		0	南	15,800
	30	南	4,320	南	21,600	南	11,668	南	11,668	南	31,300
	36	南	4,320	南	25,920	北	11,668		0	南	23,850
	42	南	4,320	南	30,240	南	11,668	南	11,668	南	39,300
	48	南	4,320	南	34,560	北	11,668		0	南	32,200
B 風 5 m/s 南西 潮流 1.5 ノット 上げ潮初期	6	北東	4,320	北東	4,320	北	11,668	北	11,668	北北東	15,000
	12	北東	4,320	北東	8,640	南	11,668		0	北東	8,700
	18	北東	4,320	北東	12,960	北東	11,668	北東	11,668	北東	24,700
	24	北東	4,320	北東	17,280	南西	11,668		0	北東	17,500
	30	北東	4,320	北東	21,600	北東	11,668	北東	11,668	北東	33,500
	36	北東	4,320	北東	25,920	南西	11,668		0	北東	26,300
	42	北東	4,320	北東	30,240	北東	11,668	北東	11,668	北東	42,300
	48	北東	4,320	北東	34,560	南西	11,668		0	北東	35,200
C 風 5 m/s 南西 潮流 1.5 ノット 下げ潮初期	6	北東	4,320	北東	4,320	南東	11,668	南東	11,668	東南東	12,300
	12	北東	4,320	北東	8,640	北西	11,668		0	東	8,640
	18	北東	4,320	北東	12,960	南西	11,668	南西	11,668	北東	1,292
	24	北東	4,320	北東	17,280	北東	11,668		0	北東	17,280
	30	北東	4,320	北東	21,600	南西	11,668	南西	11,668	北東	9,932
	36	北東	4,320	北東	25,920	北東	11,668		0	北東	25,920
	42	北東	4,320	北東	30,240	南東	11,668	南西	11,668	北東	18,572
	48	北東	4,320	北東	34,560	南西	11,668		0	北東	34,560
D 風 5 m/s 北 潮流 1.5 ノット 上げ潮初期	6	南	4,320	南	4,320	北	11,668	北	11,668	北	7,800
	12	南	4,320	南	8,640	南・南東	11,668		0	南南東	7,100
	18	南	4,320	南	12,960	北	11,668	北	11,668	西北西	1,300
	24	南	4,320	南	17,280	南東	11,668		0	南南東	13,700
	30	南	4,320	南	21,600	北・北西	11,668	北・北東	11,668	南	5,900
	36	南	4,320	南	25,920	南	11,668		0	南	21,900
	42	南	4,320	南	30,240	北	11,668	北	11,668	南	14,000
	48	南	4,320	南	34,560	南	11,668		0	南	30,500

・排出油事故に伴う海洋汚染の想定

第二海堡付近において、タンカー（260,000DWT）が座礁し、タンク底部に破口を生じ原油 1,600KL を排出した場合の想定。

「海上保安庁排出油等防除計画（東京湾排出油等防除計画）令和2年度改正分資料から出典」

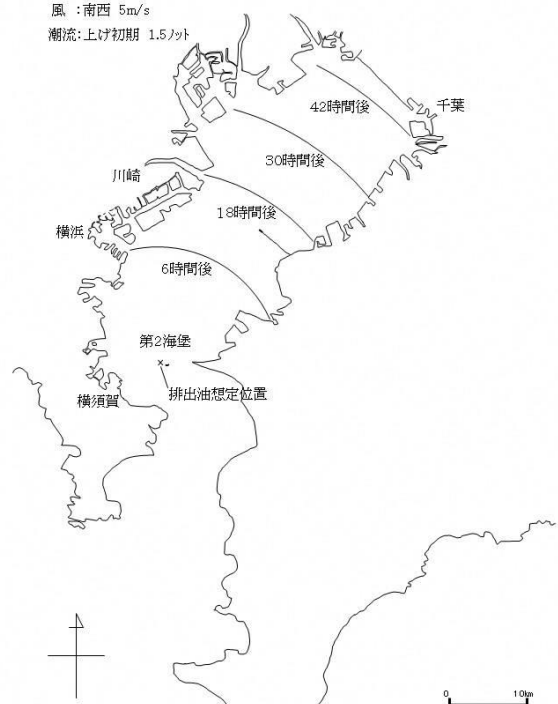
海洋汚染想定図（パターンA）

風：北 5m/s
潮流：下げ初期 1.5ノット



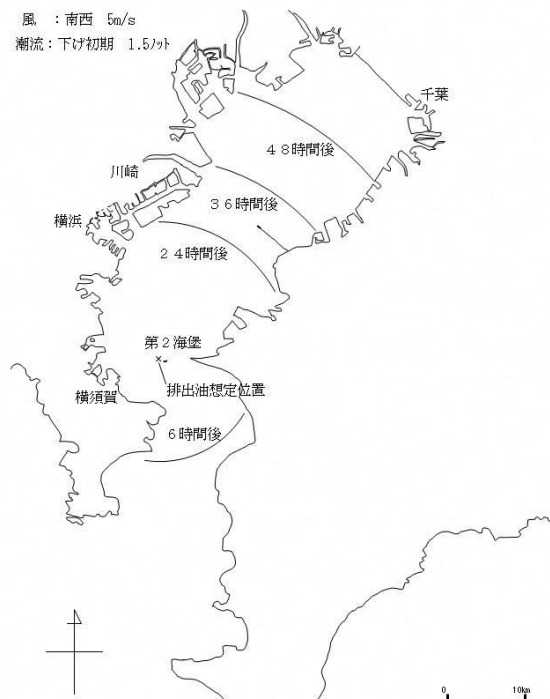
海洋汚染想定図（パターンB）

風：南西 5m/s
潮流：上げ初期 1.5ノット



海洋汚染想定図（パターンC）

風：南西 5m/s
潮流：下げ初期 1.5ノット



海洋汚染想定図（パターンD）

風：北 5m/s
潮流：上げ初期 1.5ノット



4－ 4 異常現象の発生状況

(単位：件)

年	火災	爆発	漏洩・海上流出	その他	計	死傷者数		備考
						死者	負傷者	
1977 年	12	1	14	0	27	1	12	
1978 年	13	3	12	1	29	0	10	その他：ドラムの変形
1979 年	12	2	12	0	26	0	1	
1980 年	11	0	5	1	17	0	1	その他：（詳細不明）
1981 年	5	0	4	0	9	3	3	
1982 年	9	2	4	0	15	0	8	
1983 年	4	0	7	2	13	0	5	その他：実験用小型混練機、破損（詳細不明）
1984 年	7	0	4	2	13	0	1	その他：破損（屋外タンク屋根亀裂、配管）
1985 年	5	0	1	1	7	0	0	その他：破損（配管）
1986 年	3	2	5	0	10	0	2	
1987 年	10	1	4	0	15	0	4	
1988 年	5	1	4	1	11	1	6	その他：破損（タンク）
1989 年	1	0	2	1	4	0	0	その他：破損（気水分離器鏡板）
1990 年	8	1	5	1	15	0	2	その他：容器破裂
1991 年	8	1	4	1	14	0	4	その他：破損（タンク）
1992 年	3	0	3	0	6	0	0	
1993 年	2	1	3	4	10	1	2	その他：破損（タンク 3，配管）
1994 年	7	0	6	3	16	0	4	その他：破損（ローディングアーム、製造装置）、異常反応
1995 年	11	0	4	0	15	3	53	
1996 年	3	0	6	0	9	0	5	
1997 年	7	1	4	0	12	0	0	
1998 年	7	1	3	0	11	0	5	
1999 年	4	0	7	0	11	0	5	
2000 年	10	0	3	0	13	0	2	
2001 年	6	0	4	1	11	0	0	その他：タンク変形
2002 年	7	0	5	1	13	0	0	その他：ステンレス鋼流出
2003 年	11	0	5	1	17	0	0	その他：破損
2004 年	6	1	13	0	20	0	0	
2005 年	11	0	10	1	22	0	2	その他：破損
2006 年	9	1	14	3	27	0	0	その他：破損
2007 年	5	0	10	3	18	0	0	その他：破損、防潮堤損壊
2008 年	5	0	11	1	17	0	0	その他：破損
2009 年	3	0	9	3	15	0	0	その他：破損、異常燃焼
2010 年	11	2	24	1	38	0	21	その他：破損
2011 年	8	1	26	8	43	0	0	その他：破損
2012 年	12	0	34	1	47	1	3	その他：破損
2013 年	17	0	34	2	53	0	0	その他：破損
2014 年	14	1	18	0	33	0	5	
2015 年	11	0	28	0	39	0	1	
2016 年	12	0	27	2	41	0	5	その他：破損
2017 年	17	0	23	2	42	0	0	その他：破損
2018 年	14	0	43	1	58	0	6	その他：破損
2019 年	22	1	47	0	70	0	1	
2020 年	12	1	41	2	54	0	1	その他：破損 1 件の事故に複数の事象あり
2021 年	20	0	63	1	80	0	3	その他：破損 1 件の事故に複数の事象あり
2022 年	16	0	64	5	82	0	5	その他：破損 4 件、電気系統事故 1 件
2023 年	18	3	85	2	104	0	3	その他：破損 1 件、電気系統事故 1 件
合計	434	28	764	59	1272	10	191	