

平成24年11月21日

石油コンビナートの防災アセスメント指針の改訂

財団法人 消防科学総合センター

- ・災害現象の解析に関する検討（案）・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
- ・今後の防災アセスメントの実施イメージ・・・・・・・・・・・・ 52
- ・「石油コンビナートの防災アセスメント指針」の改訂について（案）・・・ 59
- ・「東日本大震災における防災設備の被害状況等に関する調査」・・・・・・ 97
- ・北海道における石油コンビナート防災アセスメントの実施例・・・・・・ 109

災害現象の解析に関する検討（案）

（注）本資料は暫定版であり、内容については今後修正の可能性があります。

【検討の概要】

1. 災害現象解析モデル

可燃性ガスタンクやプラントの爆発・火災に伴う爆風圧や放射熱について、国内外で提示されているいくつかのモデルによる試算を行った。さらに、災害の影響が広範囲に及ぶ毒性ガスの拡散についても、複数のモデルによる比較・検討を行った。

1.1 爆発・ファイヤーボール

■ 解析モデルの比較・検討

蒸気雲爆発	TNT 等価法 (現指針)	$L = l \sqrt[3]{W_{TNT}} = l \sqrt[3]{\frac{W_G f y Q_G g}{Q_{TNT}}} \quad (P.7)$	
容器の破裂エネルギー	Baker の式	$E = \frac{P_0}{g-1} \frac{\partial P}{\partial P_0} - \frac{\partial P}{\partial P_0} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}_0} \quad (P.9)$	左記の中では、Brode や Crowl の式がより現実的で適当とされている。
	Kinney の式	$E = NRT \ln \frac{\partial P}{\partial P_0} \quad (P.9)$	
	Brode の式	$E = \frac{\partial P - P_0}{g-1} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}_0} \quad (P.9)$	
	Crowl の式	$E = NRT \ln \frac{\partial P}{\partial P_0} - \frac{\partial P}{\partial P_0} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}_0} \quad (P.9)$	
ファイヤーボールの直径・継続時間	現指針	$D = 6.21 \cdot W_g^{0.325} \quad (P.11)$ $t = 0.44 \cdot W_g^{0.349}$	
	AICHE:CCPS	$D = 5.8 \cdot W_g^{1/3} \quad (P.11)$ $t = 0.45 \cdot W_g^{1/3} \quad (W_g < 30000\text{kg})$ $= 2.6 \cdot W_g^{1/6} \quad (W_g > 30000\text{kg})$	
	長谷川・佐藤	$D = 5.25 \cdot W_g^{0.314} \quad (P.12)$ $t = 1.07 \cdot W_g^{0.181}$	
ファイヤーボールの放射熱	現指針	$E = \phi R_f = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (P.13)$ $f = \frac{\partial D}{\partial 2L} \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}_0}$	現指針ではファイヤーボールを 1750K の完全黒体 (ε=1.0) としている。
	長谷川・佐藤	$E = \frac{8.28 \cdot 10^5 W_g^{0.771}}{L^2} \quad (P.13)$	
	AICHE:CCPS	$E = \phi \tau R_f \quad (P.14)$ $R_f = \frac{r W_g H_c}{\rho D^2 t}$	

注) AICHE:CCPS: 米国化学工学会プロセス安全センター

■ 事故事例に基づく試算

事故事例	検証事項	検証結果
コスモ石油・LPGタンク爆発火災 (2011.03.11)	ファイヤーボールの直径・継続時間	実際のファイヤーボールの直径や継続時間の推定から、AICHE/CCPS の手法が最も良く適合していると考えられる。また、現指針の手法についても大きな差がない。
	ファイヤーボールの放射熱	実際にどの程度の放射熱であったかは不明であるため、各手法の比較を行った。
	爆風圧	爆発を生じる可燃性ガス量は仮定に頼ることになるが、爆風圧の算定結果は、実被害と比べて概ね妥当なものと考えられる。
三井化学・プラント爆発火災(2012.04.22)	破裂エネルギー・爆風圧	破裂エネルギー・爆風圧の試算結果は、実際の被害状況と矛盾しない。
東ソー・プラント爆発火災(2011.11.13)	爆風圧	漏洩量の推定値に幅があるが、爆風圧の試算結果は、実際の被害状況と矛盾しない。

1.2 毒性ガスの拡散

■ 解析モデル

ガス拡散	坂上モデル・連続点源の式(現指針)	$C_{xyz} = \frac{Q}{uB\sqrt{\rho A}} \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(h+z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \exp\left\{-\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right\} \quad (P.31)$ $A = q_A \int_0^x \exp(-j_A x) - 1 \quad q_A, q_B, \psi_A, \psi_B \text{ は大気安定度によって決まる拡散パラメータ。}$ $B = q_B \int_0^x \exp(-j_B x) - 1$
	ブルームモデル(Pasquill-Giffordモデル)	$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \quad (P.33)$ $\sigma_y, \sigma_z \text{ は大気安定度 (A ~ F) 別に次式で与えられる (都市部)。}$ $\begin{aligned} A \cdot B : \sigma_y &= 0.32x(1+0.0004x)^{-1/2} & \sigma_z &= 0.24x(1+0.001x)^{-1/2} \\ C : \sigma_y &= 0.22x(1+0.0004x)^{-1/2} & \sigma_z &= 0.20x \\ D : \sigma_y &= 0.16x(1+0.0004x)^{-1/2} & \sigma_z &= 0.14x(1+0.003x)^{-1/2} \\ E \cdot F : \sigma_y &= 0.11x(1+0.0004x)^{-1/2} & \sigma_z &= 0.08x(1+0.0015x)^{-1/2} \end{aligned}$
	ALOHA	米国 EPA(環境保護庁: Environmental Protection Agency) が開発した影響評価ツールであり、拡散式は「ガウス拡散モデル」と「重い気体の拡散モデル」から選択することができる。

注 1) 坂上モデル、ブルームモデル、ALOHA の「ガウス拡散モデル」は、いずれもガスの進行方向(風下方向)に対して直角方向(風横方向及び鉛直方向)の濃度分布を正規分布と仮定するもので、ガウシアンモデルと呼ばれる。ガウシアンモデルでは、空気と同程度の密度のガスを想定している。これに対し、ALOHA の「重い気体の拡散モデル」は空気よりも重いガスを想定している。

注 2) 坂上モデルの拡散パラメータについて、大気安定の場合は実測データが少ないことにより、やや不確かであるとしている(坂上、1982)。

■ 各モデルの比較

ガス拡散 (塩素)	大気中立(D)	坂上モデルと ALOHA は概ね同様の結果が得られる。ALOHA の「ガウス拡散モデル」と「重い気体の拡散モデル」とでは、後者の方がより遠方に達する。プルームモデルでは両者と比べてかなり小さく算定される。
	大気安定(F)	ALOHA の「ガウス拡散モデル」では「重い気体の拡散モデル」を大きく上回る。坂上モデルでは ALOHA の「ガウス拡散モデル」をさらに上回る。プルームモデルでは両者と比べてかなり小さく算定される。

2 . 基準値

火災による放射熱、爆発による爆風圧、毒性ガスの拡散が人体等に与える影響について、既往文献に示されているデータを整理した。

3 . 指針の見直しに向けて

解析モデル及び基準値に関する検討結果に基づき、現指針に示されたモデルを適用することの妥当性を検討した。

■ 解析モデル

爆風圧	現指針で例示されている TNT 等価法により概ね妥当な評価を行うことが可能である。
容器破裂のエネルギー (現指針では示されていない)	可能であれば、反応プロセス(異常反応の可能性)や容器の破裂圧力を推定して容器破裂のエネルギーや爆風圧を算定することになる(コンビナートアセスのような数多くの施設を対象とした評価では困難と考えられる)。
ファイヤーボール	直径及び継続時間については、現指針で例示されているモデルや AIChE:CCPS のモデルで概ね妥当な評価を行うことができる。放射熱については事故事例に基づいた検討はできないが、現指針で例示されたモデルにより、ファイヤーボールの温度を 1750K として算定した場合には、他の手法と比べて放射熱が大きく算定される。
ガス拡散	現指針で示されている坂上モデルは、大気安定度が「中立」の場合には概ね妥当と考えられるが、「安定」の場合には過大な評価結果を与える可能性がある。また、評価物質の密度が空気と比べて大分大きいまたは小さい場合にも注意が必要である。

■ 基準値

液面火災の放射熱	現指針: $2,324\text{J}/\text{m}^2\text{s}$ ($2,000\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$) 見直し: $2.3\text{kW}/\text{m}^2$ ($2.3\text{kJ}/\text{m}^2\text{s}$)	基準値自体には問題はないと考えられる。旧単位系で切れの良い $2,000\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ としており、これを国際単位系に変換したため端数が出ており、 $2.3\text{kW}/\text{m}^2$ に改める(旧単位系との併記は止める)。
----------	---	---

ファイヤーボールの放射熱	現指針: 11,620J/m ² s (10,000kcal/m ² h) 見直し: 5 ~ 10kW/m ² (5 ~ 10kJ/m ² s)	人体への影響はファイヤーボールの継続時間により異なることから、想定災害の規模に応じて、5 ~ 10kW/m ² 程度を基準値とする。
爆風圧	現指針: 高圧ガス保安法に基づく保安距離。既存製造施設に対して 11.7kPa (0.12kgf/cm ²)、新設製造施設に対して 9.8kPa (0.1kgf/cm ²)。 見直し: 2 ~ 5kPa	建屋の窓ガラスやスレート屋根が破損するなどの二次被害により人が負傷する可能性も考慮し、2 ~ 5kPa 程度の値を基準値とする。
毒性ガス拡散	現指針: IDLH(Immediate Dangerous to Life and Health) 見直し: その他の基準値についても併記する。	アセスメントにおいて IDLH を適用することは問題ないと考えられるが、毒性物質の暴露時間を考慮し、AEGLs 等の基準値を用いることも可能である。

【検討の詳細】

災害現象解析モデルについて

災害の影響算定のための解析モデルについては、平常時及び地震時で共通のものとして、次の災害現象に関する簡易なものが現指針に示されている。ただし、指針のスタンスはあくまで例示であり、アセスメントの実施においては、これらを含めて適切なモデルを選定して適用としている。

- 流出（液体、気体）
- 蒸発（揮発性液体、過熱液体、低温液化ガス）
- ガス拡散
- 液面火災
- 蒸気雲爆発・ファイヤーボール
- フラッシュ火災（可燃性ガスの拡散）

東日本大震災における市原市のLPGタンク火災では、BLEVEに伴う爆発により約3,900m離れた窓ガラスが破損するなどの被害が発生した（放射熱の影響は不明）。また、平常時ではあるが、2012年4月に山口県で発生した化学プラントの爆発事故においても爆風圧の影響は数km先まで及んでいる。このようなことから、ここでは可燃性ガスタンクやプラントの爆発に伴う爆風圧や放射熱について国内外で提示されているいくつかのモデルによる試算を行い、現指針に示されたモデルを適用することの妥当性を検討する。さらに、災害の影響が広範囲に及ぶ毒性ガスの拡散についても、複数のモデルによる比較・検討を行い、モデル選定・適用にあたっての一助とする。

1．爆発・ファイヤーボール

1.1 解析モデル

1.1.1 蒸気雲爆発

タンクや配管が破損して大量の可燃性ガスが大気中に放出された場合、空気と混合して可燃性蒸気雲を形成し、着火すると大規模な爆発を起こす。そのときの爆風圧の影響を算定するための手法としては、TNT等価モデル、TNO MULTI-ENERGYモデルなどがあるが、一般的に用いられているのはTNT等価モデルであり、現指針でもこのモデルを提示している。また、高圧ガス保安に関わる法令や技術指針もこのモデルがベースになっている。なお、土橋他（2009）は、これらのモデルによる計算値と実測値との比較を行い、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している。

*) 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

TNT 等価モデルでは、爆風圧と距離との関係は次式で与えられる。

$$L = \lambda^3 \sqrt[3]{W_{TNT}} = \lambda^3 \sqrt[3]{\frac{W_G f \psi Q_G \gamma}{Q_{TNT}}} \quad (\text{式 1.1})$$

ここで、

L：爆発中心からの距離（m）

λ ：換算距離（m/kg^{1/3}：図 1.1 により爆風圧と対応）

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 × 10⁶ J/kg）

f：流出したガスの気化率（フラッシュ率）

ψ：爆発係数

γ：TNT 収率

注）爆発係数は、流出して気化したガスのうち爆発に寄与する割合（拡散ガスのうち濃度が爆発範囲内にあるガス量と考えられる）であり、一般的には 10% が用いられる。また、TNT 収率は、爆轟に寄与した混合気体の総エネルギーと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、一般的には 6.4% を用いれば安全側と考えられている。

なお、高圧ガス保安法では、式 1.1 で γ = 0.064、Q_{TNT} = 1000 kcal/kg（4.184 × 10⁶ J/kg）として次式のように表し、K の値を例えば表 1.1.1 のようにガスの種類ごとに示している（K 値に 10³ が掛かるのは W_G をトンで表しているためである）

$$L = 0.04 \lambda^3 \sqrt[3]{K W_G} \quad (\text{式 1.2})$$

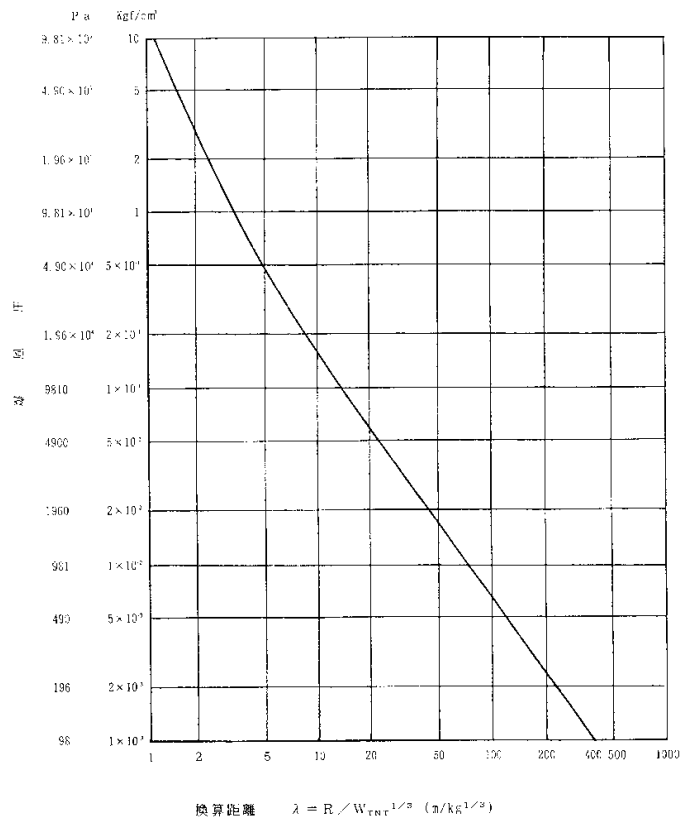
$$K = f \psi Q_G \times 10^3$$

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

$$W_{TNT} = \frac{0.064 K W_G}{1000} \quad (\text{式 1.3})$$

表 1.1.1 高圧ガス保安法による K 値の例

可燃性物質	K 値(× 10 ³)					
ブタン・ブチレン	温度()	～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～ 130	130 ～
	K 値	128	229	360	503	640
プロパン・プロピレン	温度()	～ 10	10 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 100	100 ～
	K 値	178	328	497	737	888



P : 爆風圧 (kgf/cm²)

• $P < 0.035$

$$\lambda = 2.7944P^{-0.71448}$$

• $0.035 \leq P < 0.2$

$$\lambda = 2.4311P^{-0.75698}$$

• $0.2 \leq P < 0.65$

$$\lambda = 3.143P^{-0.59261}$$

• $P \geq 0.65$

$$\lambda = 3.2781P^{-0.48551}$$

*) 近似式は「安全工学協会編：安全工学講座2・爆発, p.213」による。

図 1.1.1 換算距離と爆風圧との関係

【爆風圧の算定モデルについて】

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、現実的には殆ど起こり得ない現象であるとの指摘がある¹⁾。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²⁾。

TNT 等価法その他、爆風圧の算定モデルとしては、TNO multi-energy モデル、Baker-Strehlow モデルが良く用いられる。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¹⁾。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。

1) AIChE: Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases, 2000

2) 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

1.1.2 容器の破裂

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 1.1 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。

Baker の式

$$E = \frac{P_0}{\gamma - 1} \left[\frac{P}{P_0} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] V \quad (\text{式 1.4})$$

Kinney の式

$$E = NRT \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (\text{式 1.5})$$

Brode の式 (1959)

$$E = \left(\frac{P - P_0}{\gamma - 1} \right) V \quad (\text{式 1.6})$$

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)

P₀ : 破裂後の圧力 (大気圧 : 1.013 × 10⁵ Pa)

V : 内容積 (m³)

γ : 容器内の気体の比熱比

N : 容器内の気体のモル数

R : 気体定数 (8.314 J/mol・K)

また、AIChE ガイドラインには、Crowl による次の式が示されている。

Crowl の式 (1992)

$$E = PV \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \right] \quad (\text{式 1.7})$$

これらの式に対する評価では、ブロードの式 (式 1.6) やクロールの式が適切であり、ベーカーの式 (式 1.4) は過小に、キンネーの式 (式 1.5) は過大に評価するとされている。

*) 安全工学協会編：安全工学講座 2・爆発, p.218

*) CCPS AIChE : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition(2010), P.253

[計算例]

- 破裂前の容器内圧力： $P = 20\text{MPa} = 2 \times 10^7\text{Pa}$ (絶対圧)
- 内容積： $V = 10\text{m}^3$
- 比熱比： $\gamma = 1.4$
- TNT 火薬の燃焼熱量： $Q_{\text{TNT}} = 1000\text{kcal/kg} = 4.184 \times 10^6\text{J/kg}$

としたときの放出エネルギーと TNT 当量は、

Baker

$$E = \frac{P_0}{\gamma - 1} \left[\frac{P}{P_0} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] V = \frac{1.013 \times 10^5}{1.4 - 1} \left[\frac{2 \times 10^7}{1.013 \times 10^5} - \left(\frac{2 \times 10^7}{1.013 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{1.4}} \right] \times 10$$

$$= 3.9 \times 10^8 \text{ J} = 390 \text{ MJ}$$

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E}{Q_{\text{TNT}}} = \frac{3.9 \times 10^8}{4.184 \times 10^6} = 93 \text{ kg}$$

Kinney

$$E = NRT \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) = PV \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) = 2 \times 10^7 \times 10 \times \ln \left(\frac{2 \times 10^7}{1.013 \times 10^5} \right)$$

$$= 1.06 \times 10^9 \text{ J} = 1060 \text{ MJ}$$

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E}{Q_{\text{TNT}}} = \frac{1.06 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 253 \text{ kg}$$

Brode

$$E = \left(\frac{P - P_0}{\gamma - 1} \right) V = \left(\frac{2 \times 10^7 - 1.013 \times 10^5}{1.4 - 1} \right) \times 10$$

$$= 4.97 \times 10^8 \text{ J} = 497 \text{ MJ}$$

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E}{Q_{\text{TNT}}} = \frac{4.97 \times 10^8}{4.184 \times 10^6} = 119 \text{ kg}$$

Crowl

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

$$= 2 \times 10^7 \times 10 \times \left[\ln \left(\frac{2 \times 10^7}{1.013 \times 10^5} \right) - \left(1 - \frac{1.013 \times 10^5}{2 \times 10^7} \right) \right]$$

$$= 8.58 \times 10^8 \text{ J} = 858 \text{ MJ}$$

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E}{Q_{\text{TNT}}} = \frac{8.58 \times 10^8}{4.184 \times 10^6} = 205 \text{ kg}$$

このように Kinney の式は Baker や Brode の式に比べてかなり大きめの評価値を与える。Crowl の式による評価値は Kinney の式を若干下回る。

なお、これらの式を用いてエネルギーや TNT 当量を計算するためには破裂するときの容器圧力を推定する必要があり、防災アセスメントのようなマクロな評価で適用するには難しいところがある（現指針には示されていない）。

1.1.3 ファイヤーボール

可燃性ガスの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、市原市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。

(1) 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。

現指針

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

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

ここで、

D：ファイヤーボール直径（m）

t：継続時間（s）

W：燃焼量（燃料と理論酸素量の和）（kg）

ただし、Wは可燃性ガス量（W_g）と酸素量の合計で、プロパン（ $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ ）の場合 W_g の 4.64 倍（プロパン 1 mol に対し酸素 5 mol）となり、上式は次のように書ける。

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

$$t = 0.44 \cdot W_g^{0.349} \quad (\text{式 1.8})$$

*) 高圧ガス保安協会：コンビナート保安・防災技術指針（1974）

J.B.Gayle, J.N.Bransford: Size and Duration of Fireballs from Propellant Explosions. NASA TMX-52314, Aug.4 (1965)

AIChE（2010）

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

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

$$= 2.6 \cdot W_g^{1/6} \quad (W_g > 30000 \text{ kg}) \quad (\text{式 1.9})$$

ここで、

D：ファイヤーボールの最終的な直径（m）

t：ファイヤーボールの継続時間（s）

Wg：ファイヤーボール中の燃料量（kg）

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。

*) CCPS AIChE：Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition(2010),P.337

長谷川・佐藤（1978）

$$D = 5.25 \cdot Wg^{0.314}$$

$$t = 1.07 \cdot Wg^{0.181} \quad (\text{式 1.10})$$

ここで、

D：ファイヤーボールの最大直径（m）

t：ファイヤーボール持続時間（s）

Wg：燃料の質量（kg）

*) 長谷川和俊・佐藤公雄：炭化水素系燃料による可燃性蒸気雲の爆発特性に関する研究（ファイヤーボールに関する実験），消防研究所技術資料第 12 号, 1978.10

[計算例]

100 t のプロパンが爆発してファイヤーボールを形成したときの直径と継続時間は、Wg = 100000kg として、

現指針

$$D = 6.21 \cdot Wg^{0.325} = 6.21 \times 100000^{0.325} = 262\text{m}$$

$$t = 0.44 \cdot Wg^{0.349} = 0.44 \times 100000^{0.349} = 24\text{ s}$$

AIChE

$$D = 5.8 \cdot Wg^{1/3} = 5.8 \times 100000^{0.333} = 268\text{m}$$

$$t = 2.6 \cdot Wg^{1/6} = 2.6 \times 100000^{0.167} = 18\text{ s}$$

長谷川・佐藤

$$D = 5.25 \cdot Wg^{0.314} = 5.25 \times 100000^{0.314} = 195\text{m}$$

$$t = 1.07 \cdot Wg^{0.181} = 1.07 \times 100000^{0.181} = 8.6\text{ s}$$

100 t という大量の可燃性ガスが爆発した場合には、直径 200m 以上の巨大なファイヤーボールが形成されることが予想され、実際に市原市の事例ではこれを上回るファイヤーボールが観測されている（この事例については後で試算を行う）。なお、現指針の式（式 1.8）と AIChE の式

(式 1.9) は同程度のファイヤーボール直径を与えるが、長谷川・佐藤の式(式 1.10)ではいくぶん小さめの値となる。

(2) 放射熱

現指針

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。

$$E = \phi R_f = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{式 1.11})$$

ここで、

E : ファイヤーボールから受ける放射熱 (W/m^2)

R_f : ファイヤーボールが発散する放射熱 ($= \varepsilon \sigma T^4 : \text{W/m}^2$)

T : ファイヤーボールの温度 (K)

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

ε : 放射率

ϕ : 形態係数

形態係数 ϕ 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。

$$\phi = \left(\frac{D}{2L} \right)^2 \quad (\text{式 1.12})$$

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

現指針では、ファイヤーボールを 1750 K の完全黒体 ($\varepsilon = 1.0$) として、次式により放射熱を算定している。

$$E = 1.33 \times 10^5 \left(\frac{D}{L} \right)^2 \quad (\text{式 1.13})$$

*) 安全工学協会編：安全工学講座 1・火災, p145

長谷川・佐藤 (1978)

長谷川・佐藤は、ファイヤーボールから受ける放射熱について、実験に基づいた次式を示している。この式は AIChE ガイドラインにも掲載されている。

$$E = \frac{8.28 \times 10^5 W_g^{0.771}}{L^2} \quad (\text{式 1.14})$$

ただし、

W_g：ファイヤーボールの形成に寄与する可燃性ガス量（kg）

L：ファイヤーボール中心からの距離（m）

AIChE

AIChE ガイドラインには次のような手法も示されている。

$$E = \varphi \tau R_f \quad (\text{式 1.15})$$

ただし、

φ ：形態係数

R_f：ファイヤーボールが発散する放射熱（W/m²）

τ ：大気中の透過率

ここで R_f は、ステファン・ボルツマンの法則ではなく、ガスの燃焼によりファイヤーボール表面から放出される熱量として次式により計算される。

$$R_f = \frac{r W_g H_c}{\pi D^2 t} \quad (\text{式 1.16})$$

ただし、

r：燃焼熱の放射率（0.3 としている）

W_g：可燃性ガス量（kg）

H_c：可燃性ガスの真発熱量（J/kg）

D：ファイヤーボール直径（m）

t：ファイヤーボール継続時間

注）総発熱量は燃焼ガス中の水蒸気の潜熱も含めた発熱量、真発熱量はこれを含めない発熱量。プロパンの場合、総発熱量が50.35MJ/kg、真発熱量が46.35MJ/kg。総発熱量は燃焼熱量と等しくなる。

また、透過率 τ は次式により計算される。

$$\tau = 2.02(p_w L_s)^{-0.09}$$
$$p_w = p_0 H \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{T_a}\right)$$

ただし、

p_w：大気の水蒸気分圧（Pa）

L_s：ファイヤーボール表面から受熱面までの距離（m）

p₀：大気圧（Pa）

H：相対湿度（比率）

Ta : 気温 (K)

注) 現指針の手法では、液面火災やファイヤーボールの放射熱計算において大気の透過率は考慮されていないが、海外の手法では無視できないとして考慮されている。

[計算例]

100 t のプロパンが爆発してファイヤーボールを形成したとき、中心から 500m の地点の放射熱は、

- $W_g = 100000\text{kg}$
- $D = 260\text{m}$ 、 $t = 20\text{s}$ (1.1.3 (1) の計算例に基づく)

現指針

式 1.13 から

$$E = 1.33 \times 10^5 \left(\frac{D}{L} \right)^2 = 1.33 \times 10^5 \times \left(\frac{260}{500} \right)^2 = 36 (\text{kW} / \text{m}^2)$$

長谷川・佐藤

式 1.14 から

$$E = \frac{8.28 \times 10^5 W_g^{0.771}}{L^2} = \frac{8.28 \times 10^5 \times 100000^{0.771}}{500^2} = 24 (\text{kW} / \text{m}^2)$$

AIChE

ファイヤーボールが発散する放射熱は式 1.16 から、

$$R_f = \frac{r W_g H_c}{\pi D^2 t} = \frac{0.3 \times 10^5 \times 46.35 \times 10^6}{3.14 \times 260^2 \times 20} = 327 \text{kW} / \text{m}^2$$

となる (プロパンの真発熱量は 46.35MJ/kg)。形態係数は、

$$\phi = \left(\frac{D}{2L} \right)^2 = \left(\frac{260}{2 \times 500} \right)^2 = 0.068$$

気温 25 (298K) 相対湿度 50% とすると、

$$p_w = p_0 H \exp \left(14.4114 - \frac{5328}{T_a} \right) = 101325 \times 0.5 \times \exp \left(14.4114 - \frac{5328}{298} \right) \\ = 1580 \text{Pa}$$

$$\tau = 2.02 (P_w L_s)^{-0.09} = 2.02 \times \left[1580 \times \left(500 - \frac{260}{2} \right) \right]^{-0.09} = 0.61$$

したがって、中心から 500m の地点で受ける放射熱は、

$$E = \phi \pi R_f^2 = 0.068 \times 0.61 \times 327 = 14 \text{ kW} / \text{m}^2$$

となる（透過率を 1.0 とすると 22kW/m²）。

このように、直径 260m もの巨大なファイヤーボールの場合、中心から 500m（表面から 240m）離れたところでも強い放射熱を受けることになるが、その強度は手法によって大きな開きがある。特に、現指針の手法はかなり大きめの評価値を与えるが、この手法では R_f がファイヤーボール温度の 4 乗に比例して増大するため、わずかな温度の違いが放射熱強度に大きく影響する。式 1.13 では温度を 1750K としているが、長谷川・佐藤は n-ペンタンのファイヤーボールで 1150 ~ 1520K という温度を得ている。現指針による手法で、仮に $T = 1500\text{K}$ として計算すると、 $E = 20 \text{ kW/m}^2$ となり、他の手法と近い値を与える。

*) K.Hasegawa・K.Sato : Study on the Fireball following Steam Explosion of n-Pentan, Proc. of the 2nd International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in Process Industries, p. VI-297 (1977)

1.2 事故事例に基づく試算

1.2.1 コスモ石油・LPGタンク爆発火災（2011.03.11）

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生により、千葉縣市原市のコスモ石油においてLPGタンクが倒壊し、これによりLPG配管を破損して火災が発生、隣接するタンクが5回爆発、火災がタンクヤード全体に拡大した。このとき、最初にBLEVEにより爆発したタンク（17:04に爆発した374番タンク）について放射熱及び爆風圧の試算を行う。コスモ石油事故調査報告書によると、このタンクは容量2,000klの液化プロパンタンクで、被災時の残量は600kl、圧力は1.0MPaとなっている。

*) 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年8月

(1) ファイヤーボールの直径・継続時間

被災時、タンク中の液化プロパンの量は600kl（比重0.5とすると $W_g = 300\text{ t}$ ）であり、これがBLEVEにより蒸気雲を形成し、着火・爆発してファイヤーボールとなった。瞬時に気化してファイヤーボールの形成に寄与したプロパンの量は不明であるが、常温で漏洩したときの気化率（フラッシュ率）が0.364^{*)}であることを考慮すると、100 t以上であることが推察される。したがって、可燃性ガス量を100、150、200、250、300 tとしたときに形成されるファイヤーボールの直径と継続時間を各手法により計算した（高温に曝されたとはいえ全量の300 tが気化してファイヤーボールを形成したとは考えにくい）。

*) 高圧ガス保安協会：コンビナート保安・防災技術指針（1974）

算定結果は表 1.1.2 に示すとおりである。実際のファイヤーボールは、当日記録された動画などから直径およそ300m、継続時間20 s程度であったようである。表 1.1.2 の算定結果から、タンク内の液化プロパン300 tのうち150～200 tが瞬時に気化して蒸気雲を形成し、これが爆発してファイヤーボールになったと考えるとつじつまが合う。なお、ファイヤーボールの直径と継続時間の算定結果の双方を見ると、AIChE（2010）の手法が最もよく適合しているといえる。

表 1.1.2 ファイヤーボールの直径・継続時間の算定結果（コスモ石油）

Wg (t)		現指針	AIChE	長谷川・佐藤
100	直径(m)	262	268	195
	継続時間(s)	24	18	9
150	直径(m)	299	307	222
	継続時間(s)	28	19	9
200	直径(m)	328	338	242
	継続時間(s)	31	20	10
250	直径(m)	353	364	260
	継続時間(s)	34	21	10
300	直径(m)	374	387	275
	継続時間(s)	36	21	10

(2) ファイヤーボールの放射熱

ファイヤーボールの直径（D）を 300m、図 1.1.2 のような位置関係を想定し、中心直下から任意の距離 X にある地点で受ける放射熱を各手法により計算する。ここで、受熱面はファイヤーボール中心に正対しているとし、ファイヤーボール中心の高さ（Z）は AIChE（1994）により次のとおりとする。

$$Z = 0.75 \cdot D = 0.75 \times 5.8 \times 100000^{1/3} = 225\text{m}$$

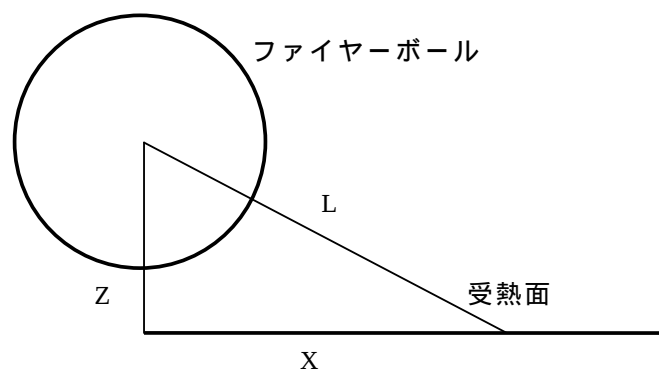


図 1.1.2 換算距離と爆風圧との関係

算定結果は図 1.1.3 に示すとおりである。現指針の手法については、ファイヤーボール温度を 1750K と 1500K としたときの値を示してある。なお、AIChE の手法では、気温 15℃、相対湿度 50%として透過率を計算している。

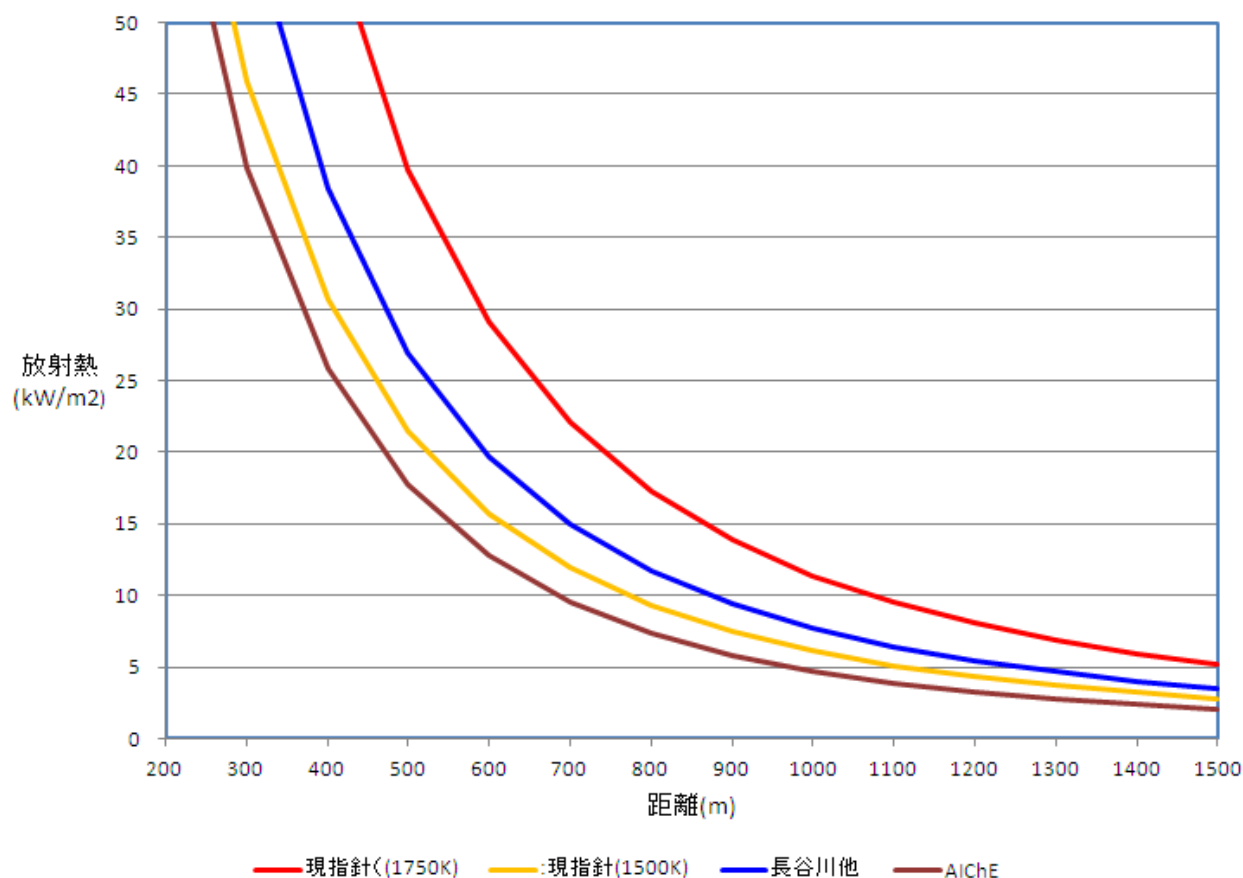


図 1.1.3 ファイヤーボールの放射熱の算定結果（コスモ石油）

また、参考として米国 EPA（環境保護庁：Environmental Protection Agency）が開発した影響評価ツール ALOHA で算定した結果を図 1.1.4 に示す（このソフトウェアは経済産業省の HP から無償ダウンロードできる）。算定条件は、タンク容量 2000kl、残量 600kl での BLEVE（ファイヤーボール形成に寄与するガス量は自動計算）、気温 15℃、相対湿度 50%とした。ALOHA による算定結果は、図 1.1.3 で現指針（1500K）及び長谷川・佐藤による値に近いものになっている。この事故事例において、実際にどの程度の放射熱を受けたかは不明であるが、現指針に示された $T = 1750\text{ K}$ としたときの放射熱の算定は、予測としては過大評価のように思われる。

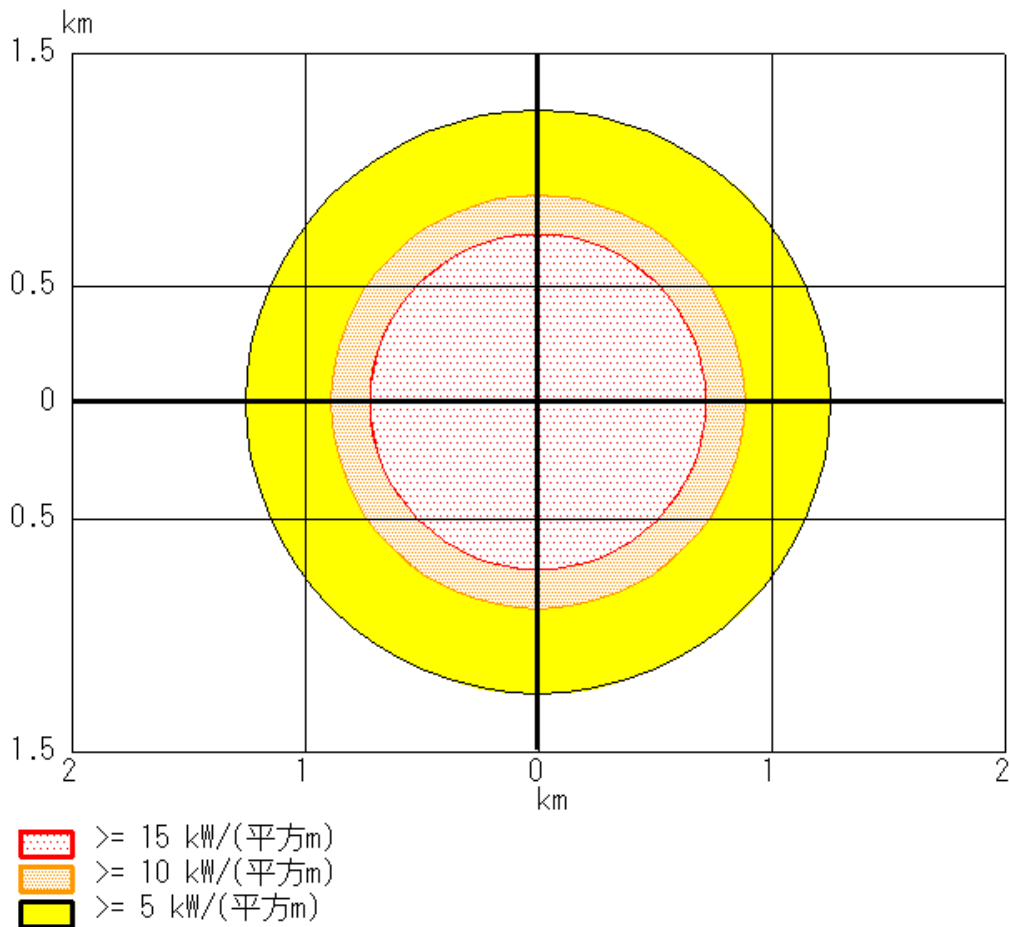


図 1.1.4 ALOHA によるファイヤーボールの放射熱（コスモ石油）

(3) 爆風圧

コスモ石油のLPG爆発事故では、爆風圧の影響もあり、事業所内建屋のスレート屋根や窓ガラス、また3 km 以上離れた民家の窓ガラスが破損するなどの被害が発生している。そこで、前記と同じタンクについて、TNT 等価法(式 1.1)を用いて蒸気雲爆発に伴う爆風圧の試算を行った。算定にあたっては、液化ガスの流出量(W_G)をタンク残量の300 t とし、K 値は放射熱の影響を算定したときの条件(概ね半分が気化して蒸気雲を形成)と合せるため、表 1.1 の40~70 のときの値である 497×10^3 とした(フラッシュ率が概ね0.5)。したがって、爆発時のTNT 当量は次のようになる。

$$W_{TNT} = \frac{0.064KW_G}{1000} = \frac{0.064 \times 497 \times 10^3 \times 300}{1000} = 9542 \text{ kg}$$

注) 放射熱と爆風圧の算定式はまったく別に関連されたものであり、1つの爆発においてそれぞれで計算されるような影響が同時に起こるというわけではない。どちらの影響が大きいかは、着火したときの蒸気雲の混合状態によって決まるものと推察される。コスモ石油の事故では計5回の爆発が発生しており、どの爆発でガラスが破損したかは不明であるが、1つの試算として上記のような条件を設定した。

算定結果は表 1.1.3 に示すとおりである。同表には Clancey (1972) による爆風圧と被害の関係をあわせて示した(Clancey による爆風圧と被害との関係は AIChE ガイドラインや平成 6 年の消防庁指針にも引用されている)。

*) (株)テクノシステム：防火・防爆対策技術ハンドブック, p.452

Clancey,V.J. : Diagnostic features of explosion damage. Sixth Int.Mtg of Forensic Sciences, Edinburgh (1972)

表 1.1.3 爆風圧の算定結果 (コスモ石油)

爆風圧 (kPa)	距離(m)	影響の内容
70	82	70kPa: ほとんどの建物が崩壊する。
65	85	63kPa: 貨車が全壊する。
60	89	
55	94	50 ~ 55kPa: 強化していない厚さ20 ~ 30cmのブロックがせん断等により破損。
50	99	
45	106	35 ~ 50kPa: 家屋が全壊する。
40	113	
35	123	
30	134	28kPa: 軽量建築物が全壊する。
25	150	21 ~ 28kPa: 無筋建物、鋼板建物が破壊する。油貯槽が破裂する。
20	171	17kPa: レンガ造家屋の50%が破壊する。
15	213	16kPa: 建物の大きな被害の限界。
10	290	14 ~ 21kPa: 未強化コンクリートやブロック塀が破壊する。 14kPa: 家屋の壁や屋根が一部破壊する。
9	314	9kPa: 建物のスチール製フレームが多少曲がる。
8	343	
7	380	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。 3.5 ~ 7kPa: 大小の窓ガラスが普通破壊される。窓枠も時には破壊される。
6	427	
5	490	
4	580	
3	715	2.8kPa: 建物の小さな被害の限界。
2	956	2.1kPa: 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。
1	1568	1kPa: ガラスが破壊される一般的な圧力。
0.5	2573	0.7kPa: 歪のある小さな窓が破壊される。
0.2	4952	0.21kPa: 歪のある大きな窓ガラスが破壊される。

一方、コスモ事故報告書（添付 - 8）によると、事業所内の爆風圧によると思われる被害の発生状況は表 1.1.4 に示すとおりである。同表には、被害のあった距離における計算上の爆風圧（ $W_{TNT}=9542\text{kg}$ としたときの計算値）もあわせて示している。

これによると、計算上の爆風圧が 15kPa を超える約 200m 以内の範囲でドア（シャッター）・窓枠の破損、安全限界（Clancey による）とされる 2.1kPa を超える約 900m 以内の範囲で室内天井、スレート、窓ガラスなどの破損が見られる。また、爆発タンクから 3200m 、 3300m 、 3900m 離れた民家の窓ガラスが破損しているが（報告書・添付 - 10）表 1.3 によると「ガラスが破壊される一般的圧力（ 1kPa ）」が約 1500m 、 $2 \sim 3\text{km}$ 程度離れても「歪のある窓ガラスが破損される」とされている。これらのことから、爆風圧の算定結果は、実被害と比べて概ね妥当なものといえよう。

このような BLEVE による災害事象の事前評価を行う場合、タンク内の液量をもとにファイヤーボールの放射熱や爆風圧による影響算定を行うことになるが、蒸気雲形成に寄与するガス量の想定が重要になってくる。

表 1.1.4 爆風圧による被害状況（コスモ石油）

建屋・設備	距離(m)	被害状況	爆風圧(kPa)
ガスタービン発電所用 電気室	139	ドア・窓枠	28.4
3PK-C電気室	164	ドア・窓枠	21.4
ガスタービン発電所用 電気室	176	ドア・窓枠	19.2
CO2消火設備	176	スレート屋根	19.2
第2硫黄回収装置 電気室	185	窓ガラス	18.1
ブロンアスファルト 計器室	185	窓ガラス・室内天井	18.1
アスファルトローリー出荷場	197	スレート屋根	16.6
製造3課分解係 計器室	218	窓ガラス・室内天井	14.5
旧ブロンアスファルト充填場南側建屋トイレ	218	ドア・窓枠・室内天井	14.5
北岸CCSセンター	223	窓ガラス・室内天井	14.1
C空地	227	ドア・窓枠・室内天井	13.8
旧ブロンアスファルト充填場	227	スレート・スレート屋根	13.8
旧ブロンアスファルト充填場南側建屋	231	スレート・スレート屋根	13.5
流動接触改質装置 コンプレッサーハウス	273	スレート・スレート屋根	10.8
協力会社詰所	290	ドア・窓枠・室内天井	10.0
PR-7前 小屋	294	スレート・スレート屋根	9.8
エアセンター電気室	302	窓ガラス	9.4
第1エアセンター	323	スレート・スレート屋根	8.6
第4号倉庫	336	スレート・スレート屋根	8.2
動力センター	361	窓ガラス	7.5
PR-8前 小屋	382	ドア・窓枠・窓ガラス	6.9
製造2課 計器室	391	窓ガラス	6.7
コスモエンジニアリング建屋	424	窓ガラス・室内天井	6.0
第3ポンプ室 電気室	428	ドア・窓枠・スレート・窓ガラス	6.0
現場事務所	433	窓ガラス・室内天井	5.9
船員休憩室	475	窓ガラス	5.2
第2接触改質装置	596	窓ガラス	3.8
第2接触改質装置	601	屋根ガラス	3.8
製造4課 計器室	605	窓ガラス	3.8
防災センター	693	窓ガラス	3.1
厚生施設	718	窓ガラス・室内天井	3.0
本館事務所	731	窓ガラス	2.9
第1号倉庫	743	スレート	2.8
2PK 事務所	748	窓ガラス	2.8
第2号倉庫	760	スレート	2.8
工場	790	スレート	2.6
1PK 出荷センター	794	窓ガラス・室内天井	2.6
危険物倉庫	815	ドア・窓枠	2.5
1PK 正門入口 監視小屋	815	窓ガラス・スレート	2.5
正門受付	815	窓ガラス	2.5
製造1課 計器室	848	窓ガラス	2.4
製造1課 コンプレッサーハウス	857	スレート・スレート屋根	2.3
排水処理設備	928	窓ガラス・スレート	2.1

注 1)「距離」は爆発した 374 番タンクからの距離を表す。

注 2)「爆風圧」は $W_{TNT}=9542\text{kg}$ としたときの計算上の爆風圧である。

1.2.2 三井化学・プラント爆発火災（2012.04.22）

この事故は、化学プラント（レゾルシン製造施設）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容器の温度・圧力が急上昇して破裂、可燃物に着火し爆発火災に至ったもので、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。

(1) 破裂・爆風エネルギー

三井化学事故調査報告書では、FEM 解析により容器破裂時の内部圧力を 9.6MPa（ゲージ圧）として、破裂により放出されたエネルギーを次のように算定している。

*) 三井化学㈱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 年 8 月 16 日

- 破裂時圧力（絶対圧）：9.7MPa
- 容器容積：288m³（気相部：198m³）
- 内容物の比熱比：1.3

Baker の式（式 1.4）

$$E = \frac{P_0}{\gamma - 1} \left[\frac{P}{P_0} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] V = \frac{1.013 \times 10^5}{1.3 - 1} \left[\frac{9.7 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} - \left(\frac{9.7 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{1.3}} \right] \times 198$$
$$= 4.2 \times 10^9 J = 4200 MJ$$
$$W_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{4.2 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 1000 kg$$

Brode の式（式 1.6）

$$E = \left(\frac{P - P_0}{\gamma - 1} \right) V = \left(\frac{9.7 \times 10^6 - 1.013 \times 10^5}{1.3 - 1} \right) \times 198$$
$$= 6.3 \times 10^9 J = 6300 MJ$$
$$W_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{6.3 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 1500 kg$$

また、この報告書には載っていないが、破裂エネルギーを他の式で試算すると次のようになる。

Kinney の式 (式 1.5)

$$\begin{aligned} E &= NRT \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) = PV \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) = 9.7 \times 10^6 \times 198 \times \ln \left(\frac{9.7 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} \right) \\ &= 8.8 \times 10^9 \text{ J} = 8800 \text{ MJ} \\ W_{TNT} &= \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{8.8 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 2100 \text{ kg} \end{aligned}$$

Crowl の式 (式 1.7)

$$\begin{aligned} E &= NRT \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \right] = PV \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \right] \\ &= 9.7 \times 10^6 \times 198 \times \left[\ln \left(\frac{9.7 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} \right) - \left(1 - \frac{1.013 \times 10^5}{9.7 \times 10^6} \right) \right] \\ &= 6.9 \times 10^9 \text{ J} = 6900 \text{ MJ} \\ W_{TNT} &= \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{6.9 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 1600 \text{ kg} \end{aligned}$$

(2) 爆風圧

適切とされている Brode の式と、過大評価とされているが最大値を与える Kinney の式により得られる TNT 当量をもとに爆風圧の試算を行う。算定結果は表 1.5 及び表 1.6 に示すとおりである (事故調査報告書では、上記のエネルギーのうち 159MJ が容器の破断及び飛散に消費されたとされているが、全体の 5 % 以下であるため無視した)。

三井化学事故調査報告書には、爆風の影響と見られる次の被害が掲載されている (報告書ではこの被害状況から TNT 当量を試算している)。

- 民家のガラス窓が割れた : 2400m → 512kg
- 体育館のガラスが割れた : 680m → 759kg
- 周辺建物のスレートが粉砕 : 190m → 1136kg

表 1.1.5 及び表 1.1.6 によると、「建物の大きな被害の限界 (16kPa)」が 100 ~ 120m、「住めなくなる程度の家屋の一部破壊 (7kPa)」が 200 ~ 230m、「ガラスが割れる一般的な圧力 (1kPa)」が 900m 程度、1 ~ 2 km 離れても「歪のある窓ガラスの破損」の可能性があり、この被害状況と矛盾しない。

表 1.1.5 爆風圧の算定結果（三井化学・Brode： $W_{TNT} = 1500\text{kg}$ ）

爆風圧 (kPa)	距離(m)	影響の内容
70	44	70kPa: ほとんどの建物が崩壊する。
65	46	63kPa: 貨車が全壊する。
60	48	
55	51	50～55kPa: 強化していない厚さ20～30cmのブロックがせん断等により破損。
50	54	
45	57	
40	61	35～50kPa: 家屋が全壊する。
35	66	
30	73	
25	81	21～28kPa: 無筋建物、鋼板建物が破壊する。油貯槽が破裂する。
20	92	17kPa: レンガ造家屋の50%が破壊する。
15	115	16kPa: 建物の大きな被害の限界。
10	157	14～21kPa: 未強化コンクリートやブロック塀が破壊する。
9	170	14kPa: 家屋の壁や屋根が一部破壊する。
8	185	9kPa: 建物のスチール製フレームが多少曲がる。
7	205	
6	230	7kPa: 住めなくなる程度に家屋の一部が破壊される。
5	265	5kPa: 家屋が多少の被害を被る。
4	313	3.5～7kPa: 大小の窓ガラスが普通破壊される。窓枠も時には破壊される。
3	386	
2	516	2.8kPa: 建物の小さな被害の限界。
1	846	2.1kPa: 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。
0.5	1389	1kPa: ガラスが破壊される一般的な圧力。
0.2	2673	0.7kPa: 歪のある小さな窓が破壊される。
		0.21kPa: 歪のある大きな窓ガラスが破壊される。

表 1.1.6 爆風圧の算定結果（三井化学・Kinney： $W_{TNT} = 2100\text{kg}$ ）

爆風圧 (kPa)	距離(m)	影響の内容
70	50	70kPa: ほとんどの建物が崩壊する。
65	51	63kPa: 貨車が全壊する。
60	54	
55	57	50～55kPa: 強化していない厚さ20～30cmのブロックがせん断等により破損。
50	60	
45	64	
40	68	35～50kPa: 家屋が全壊する。
35	74	
30	81	28kPa: 軽量建築物が全壊する。
25	90	21～28kPa: 無筋建物、鋼板建物が破壊する。油貯槽が破裂する。
20	103	17kPa: レンガ造家屋の50%が破壊する。
15	129	16kPa: 建物の大きな被害の限界。
10	175	14～21kPa: 未強化コンクリートやブロック塀が破壊する。
9	190	14kPa: 家屋の壁や屋根が一部破壊する。
8	207	9kPa: 建物のスチール製フレームが多少曲がる。
7	229	
6	258	7kPa: 住めなくなる程度に家屋の一部が破壊される。
5	296	5kPa: 家屋が多少の被害を被る。
4	350	3.5～7kPa: 大小の窓ガラスが普通破壊される。窓枠も時には破壊される。
3	432	2.8kPa: 建物の小さな被害の限界。
2	577	2.1kPa: 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。
1	947	1kPa: ガラスが破壊される一般的な圧力。
0.5	1554	0.7kPa: 歪のある小さな窓が破壊される。
0.2	2990	0.21kPa: 歪のある大きな窓ガラスが破壊される。

また、発災プラントの概ね 300m以内で図 1.5 に示すような機器・配管類の被害が発生している。これらの被害は飛散物の影響も大きい。算定結果（表 1.1.5 及び表 1.1.6）を見ても、爆風圧が 20kPa を超える約 100m以内の範囲では大きな被害の可能性がある。

なお、防災アセスメントでは、このような容器破裂による影響算定を取り入れることは難しいと考えられる（異常反応の可能性のあるプラントの特定や破裂圧力の推定が困難）。その場合、容器内の内容物の全量漏洩を想定して爆風圧の算定を行うことになるが、内容物の種類や量によっ

ては過小評価となる可能性もある。また、容器破裂では液量が少なく気相部が大きいほど破裂エネルギーが大きくなるが、漏洩爆発では液量（可燃性ガス）が多いほど影響は大きく算定されることになる。

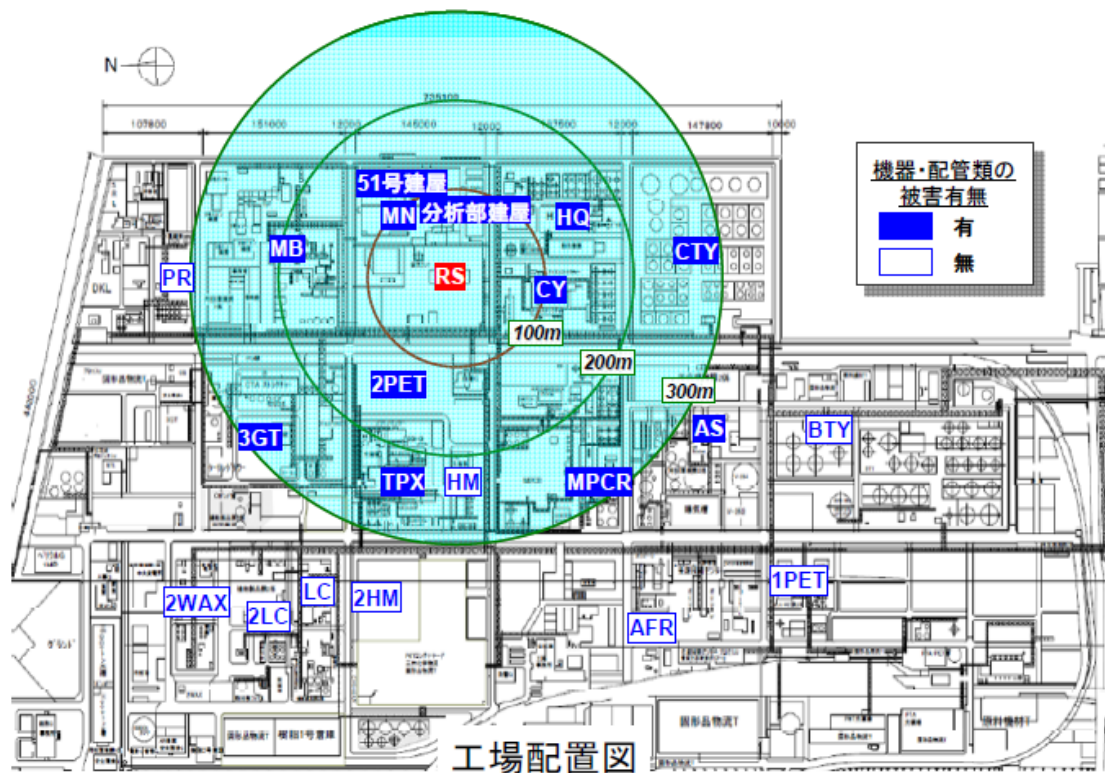


図 1.1.5 発災プラント近傍の機器・配管類の被害状況（三井化学事故調査報告書による）

*) 三井化学㈱岩国大竹工場：レゾルシン製造施設爆発・火災事故にかかわる報告書, 2012 年 8 月 16 日

1.2.3 東ソー・プラント爆発火災（2011.11.13）

東ソー事故調査報告書によると、この事故は、化学プラント（塩化ビニルモノマー製造施設）において緊急放出弁の故障によりインターロックが作動したあと、塩酸塔ロードダウン操作時の調整不足により塔頂部の温度・圧力が急上昇して破裂に至ったものである。事故拡大のプロセスは次のとおりとされている（BLEVE）。

- 1) 容器（塩酸塔還流槽）の内圧上昇による亀裂
- 2) 容器内の内容物（可燃物）が噴出
- 3) ほとんど同時に容器内部で突沸・蒸気爆発
- 4) 容器が大破裂し内容物が周辺に飛散
- 5) 飛散した内容物が爆発炎上
- 6) 大爆発に拡大
- 7) 他の容器からも内容物が漏洩し爆発的燃焼

*) 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，平成 24 年 6 月 4 日

同報告書（添付資料 7）では、爆風による周囲の被害状況をもとに、TNT 等価法により表 1.1.7 のように TNT 当量を算出し、VCM の漏洩量を 7500～13500kg と推定している（VCM の K 値は 160 以上の 238×10^3 としている）。なお、容器内の VCM の量は 25 t であったとされている（VCM：塩化ビニルモノマー。実際には VCM、二塩化エタン、塩酸の混合物）。

表 1.1.7 VCM 漏洩量の算定（東ソー事故調査報告書による）

ケース	被害状況	爆風圧 (kPa)	被災距離 (m)	換算距離 λ	TNT 当量 (kg)	VCM 漏洩量 (kg)
1	クレーターの縁ができる限界	210	12	2.4	125	8220
2	建物の大きな被害の限界	16	61	10.3	205	13500
3	家の壁や屋根が一部破壊される	14	59	11.1	150	9880
4	家屋が多少の被害を被る	5	113	23.3	114	7500
5	柱が歪んだり折れたりする	58.83	27	4.6	203	13400

TNT 当量を最大値の 205kg としたときの爆風圧の算定結果を表 1.1.8 に示しておく。アセスメントにおいては、漏洩量を容器全量の 25 t として算定することになり、爆風圧の影響はこの表よりも大きくなるが、事前評価としては問題ないといえる。

表 1.1.8 爆風圧の算定結果（東ソー：W_{TNT} = 205kg）

爆風圧 (kPa)	距離(m)	影響の内容
70	23	70kPa: ほとんどの建物が崩壊する。
65	24	63kPa: 貨車が全壊する。
60	25	
55	26	50～55kPa: 強化していない厚さ20～30cmのブロックがせん断等により破損。
50	28	
45	29	35～50kPa: 家屋が全壊する。
40	32	
35	34	
30	37	28kPa: 軽量建築物が全壊する。
25	42	21～28kPa: 無筋建物、鋼板建物が破壊する。油貯槽が破裂する。
20	48	17kPa: レンガ造家屋の50%が破壊する。
15	59	16kPa: 建物の大きな被害の限界。
10	81	14～21kPa: 未強化コンクリートやブロック塀が破壊する。
9	87	14kPa: 家屋の壁や屋根が一部破壊する。
8	96	9kPa: 建物のスチール製フレームが多少曲がる。
7	106	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。 3.5～7kPa: 大小の窓ガラスが普通破壊される。窓枠も時には破壊される。
6	119	
5	136	
4	161	
3	199	2.8kPa: 建物の小さな被害の限界。
2	266	2.1kPa: 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。
1	436	1kPa: ガラスが破壊される一般的な圧力。
0.5	715	0.7kPa: 歪のある小さな窓が破壊される。
0.2	1377	0.21kPa: 歪のある大きな窓ガラスが破壊される。

1.3 飛散物の影響

BLEVE やプラントの容器破裂では、放射熱や爆風圧のほか飛散物によっても周辺に被害を及ぼす。コスモ石油のLPG爆発事故では、約100m離れた隣接タンクヤードのアスファルトタンクに破片が突き刺さり、内容物が漏洩している。事業所外については、タンク破片が最大約1,300m、板金が最大約6,200mの遠方まで飛散するとともに、最大約3,900mの地点でガラスの破損が確認された。

2 . 毒性ガスの拡散

2.1 解析モデル

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（風横方向及び鉛直方向）の濃度分布を正規分布と仮定して解析するものである。代表的なものとしてプルームモデル（Pasquill-Gifford モデル）があるが、国内の安全性評価では坂上モデルが使用されることが多く、現指針にもこのモデルが示されている。

(1) 坂上モデル（現指針）

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。

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。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(-\frac{y^2}{A}\right) \exp\left(-\frac{(h+z)}{B}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{hz}}{B}\right) \quad (\text{式 2.1})$$

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

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

ただし、

C_{xyz} : 任意の地点 (x, y, z) のガス濃度（体積比率）で 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^3/s)

u : 風速 (m/s)

h : ガス発生源の高さ (m) で ($0, 0, h$) が発生源の座標となる

$q_A, q_B, \varphi_A, \varphi_B$: 拡散パラメータ（表 1.2.1）

I_0 : 0 次の虚数単位ベッセル関数

表 1.2.1 坂上モデルの拡散パラメータの値

大気安定度 ¹⁾	h(m) ²⁾	ϕ_A ³⁾	$\sqrt{q_A}$ ⁴⁾	ϕ_B ⁵⁾	q_B ⁶⁾
安 定 ¹⁾	0.5 ²⁾	4.78×10^{-2} ³⁾	4.26 ⁴⁾	4.20×10^{-2} ⁵⁾	3.50×10^{-1} ⁶⁾
	10 ²⁾	4.78×10^{-2} ³⁾	4.26 ⁴⁾	4.60×10^{-2} ⁵⁾	2.93×10^{-1} ⁶⁾
	20 ²⁾	4.78×10^{-2} ³⁾	4.26 ⁴⁾	4.71×10^{-2} ⁵⁾	2.86×10^{-1} ⁶⁾
	30 ²⁾	4.78×10^{-2} ³⁾	4.26 ⁴⁾	4.77×10^{-2} ⁵⁾	2.83×10^{-1} ⁶⁾
中 立 ¹⁾	0.5 ²⁾	1.48×10^{-2} ³⁾	1.56×10^1 ⁴⁾	1.10×10^{-2} ⁵⁾	5.30 ⁶⁾
	10 ²⁾	1.09×10^{-2} ³⁾	2.18×10^1 ⁴⁾	2.46×10^{-2} ⁵⁾	1.02 ⁶⁾
	20 ²⁾	1.01×10^{-2} ³⁾	2.37×10^1 ⁴⁾	3.00×10^{-2} ⁵⁾	7.00×10^{-1} ⁶⁾
	30 ²⁾	0.97×10^{-2} ³⁾	2.48×10^1 ⁴⁾	3.29×10^{-2} ⁵⁾	5.65×10^{-1} ⁶⁾
やや不安定 ¹⁾	0.5 ²⁾	4.50×10^{-3} ³⁾	7.59×10^1 ⁴⁾	4.25×10^{-3} ⁵⁾	3.48×10^1 ⁶⁾
	10 ²⁾	2.12×10^{-3} ³⁾	1.59×10^2 ⁴⁾	1.48×10^{-2} ⁵⁾	2.87 ⁶⁾
	20 ²⁾	1.80×10^{-3} ³⁾	1.88×10^2 ⁴⁾	1.98×10^{-2} ⁵⁾	1.61 ⁶⁾
	30 ²⁾	1.61×10^{-3} ³⁾	2.09×10^2 ⁴⁾	2.34×10^{-2} ⁵⁾	1.14 ⁶⁾
不安定 ¹⁾	0.5 ²⁾	1.12×10^{-3} ³⁾	2.77×10^2 ⁴⁾	1.30×10^{-3} ⁵⁾	3.73×10^2 ⁶⁾
	10 ²⁾	2.52×10^{-4} ³⁾	1.24×10^3 ⁴⁾	7.20×10^{-3} ⁵⁾	1.18×10^1 ⁶⁾
	20 ²⁾	1.78×10^{-4} ³⁾	1.73×10^3 ⁴⁾	1.10×10^{-2} ⁵⁾	5.19 ⁶⁾
	30 ²⁾	1.44×10^{-4} ³⁾	2.14×10^3 ⁴⁾	1.40×10^{-2} ⁵⁾	3.21 ⁶⁾

*) 坂上二郎：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

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 2.1 は次のように簡単になる。

$$C_x = \frac{Q}{uB\sqrt{\pi A}} \exp\left(-\frac{h}{B}\right) \quad (\text{式 2.2})$$

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。なお、面源から離れたところの濃度が問題になる場合には、面源からの蒸発量が 1 点から発生するとして連続点源の式を用いて計算してもよい。

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

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

$$\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt \quad (\text{式 2.3})$$

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、その他の記号は連続点源の式 (式 2.1) と同じである。

(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。

$$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (\text{式 2.4})$$

ただし、

C_{xyz} : 任意の地点(x,y,z)のガス濃度 (kg/m^3)

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)

σ_y, σ_z : y 方向、z 方向の濃度分布の標準偏差

σ_y, σ_z は大気安定度 (Pasquill の区分 A ~ F) 別に次式で与えられる (都市部)。

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 : $\sigma_y = 0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$ $\sigma_z = 0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

*) CCPS AICHE : Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, p.123, (2000)

2.2 モデルによる算定結果の比較

塩素、アンモニア、硫化水素などの毒性ガスの漏洩事故はときおり発生するものの、周囲にどの程度拡散したかはほとんどわかっていない。したがって、ここでは次のような例に対して指針のモデル (坂上モデル) を含めた複数のモデルで試算を行い、その結果を比較・検討する。

[計算例]

- タンクからの液化塩素の漏洩 (IDLH : 10ppm)
- 貯蔵圧力 : 0.6MPa
- 開口部の大きさ : 0.1cm^2
- 気温 : 25 、風速 : 2.0m/s、大気 : 中立及び安定

上記の例に対して、坂上モデルとブルームモデルにより算定した風下方向・地表面 ($y = 0$ 、 $z = 0$) のガス濃度を図 1.2.1 (大気中立) 及び図 1.2.2 (大気安定) に示す。この算定結果を見ると、両モデルによる推定濃度の開きは大きく、特に大気安定の場合、坂上式ではかなり大きく算定され両モデルの違いは顕著になっている。

これを見ただけでは、どちらのモデルが妥当か判断がつかないため、前述の米国 EPA が開発した ALOHA により、ほぼ同様の条件を設定して算定を行ったところ、結果は図 1.2.3 (大気安定度 D : 中立)、図 1.2.4 (大気安定度 E : 弱安定) 及び図 1.2.5 (大気安定度 F : 強安定) に示すとおりになった。ALOHA では、ガス密度を考慮しないガウシアンモデルと、塩素ガスのような重いガス固有のモデルを選択することが可能であり、ここでは両者のモデルによる試算結果を示している。

以上の算定結果をまとめると次のようなことがいえる。

- 大気中立 (D) の場合、ALOHA による推定濃度が 10ppm となる距離は、ガウシアンモデルで約 700m、重いガスのモデルで約 900m となる。後者のモデルの方が遠方に達しているが、これは重いガスの挙動を考えると妥当な結果と考えられる。坂上式では、大気中立の場合、濃度が 10ppm となる距離は 800m となっており、ALOHA による結果に近くなっている。一方、ブルーム式では、10ppm となる距離は 300m 弱とかなり小さく算定される。
- 大気弱安定 (E) の場合、ALOHA による推定濃度は、ガウシアンモデルと重いガスのモデルでほぼ一致する。そのときの 10ppm となる距離は約 1100m となり、坂上式で大気中立としたときよりも幾分大きくなるが大差はない。坂上式で大気安定として算定すると、10ppm となる距離は約 2800m となり (図 1.2.2 には示していない) これをはるかに上回る。
- 大気安定 (F) の場合、ALOHA による推定濃度は、重いガスのモデルでは E の場合を多少上回る程度 (10ppm が 1200 ~ 1300m) であるが、ガウシアンモデルでは E の場合を大きく上回り (10ppm が 2000m) 不自然な結果となる。坂上式で大気安定とした場合には、上記のようにこの値をも大きく上回る (10ppm が約 2800m)。

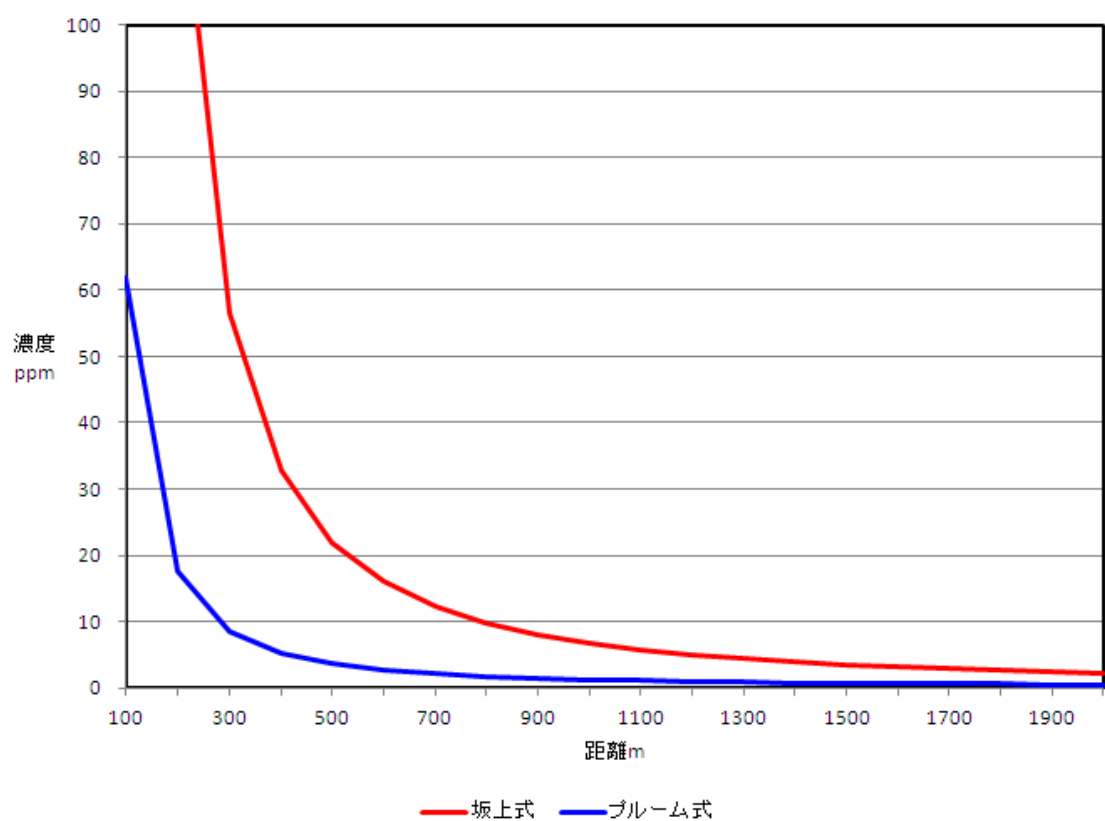


図 1.2.1 塩素ガス拡散の算定結果（大気中立）

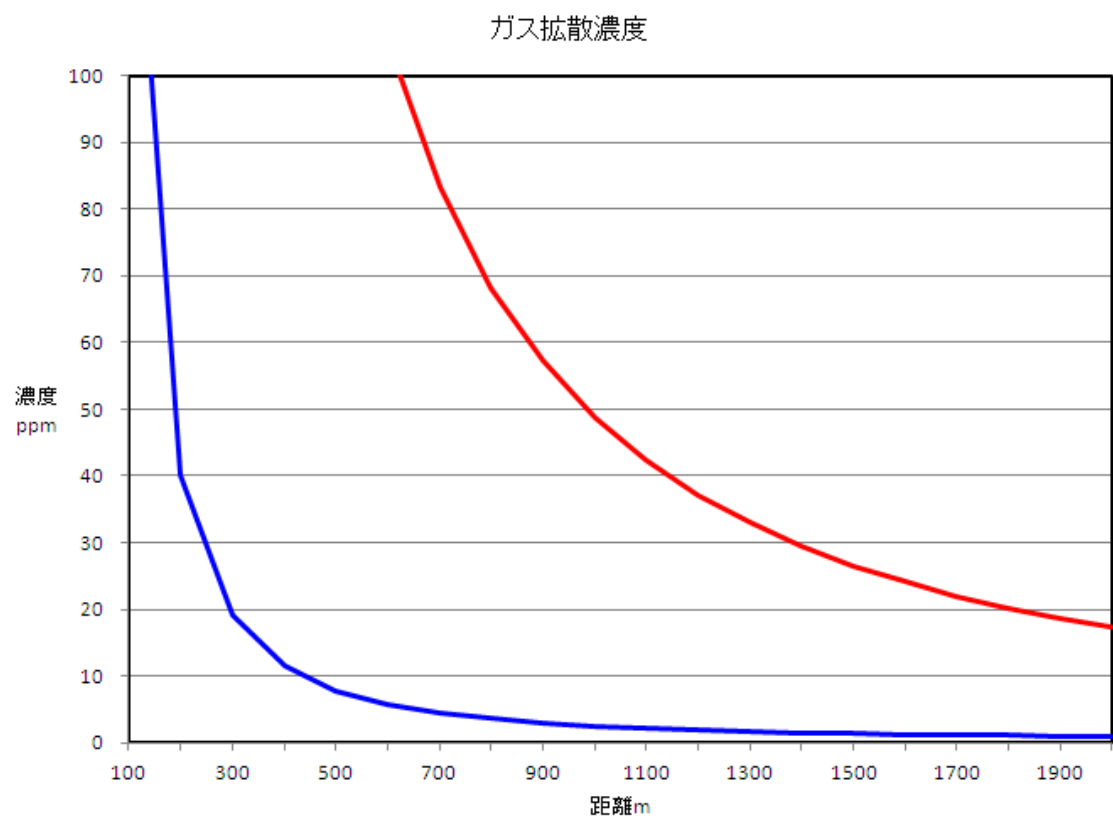
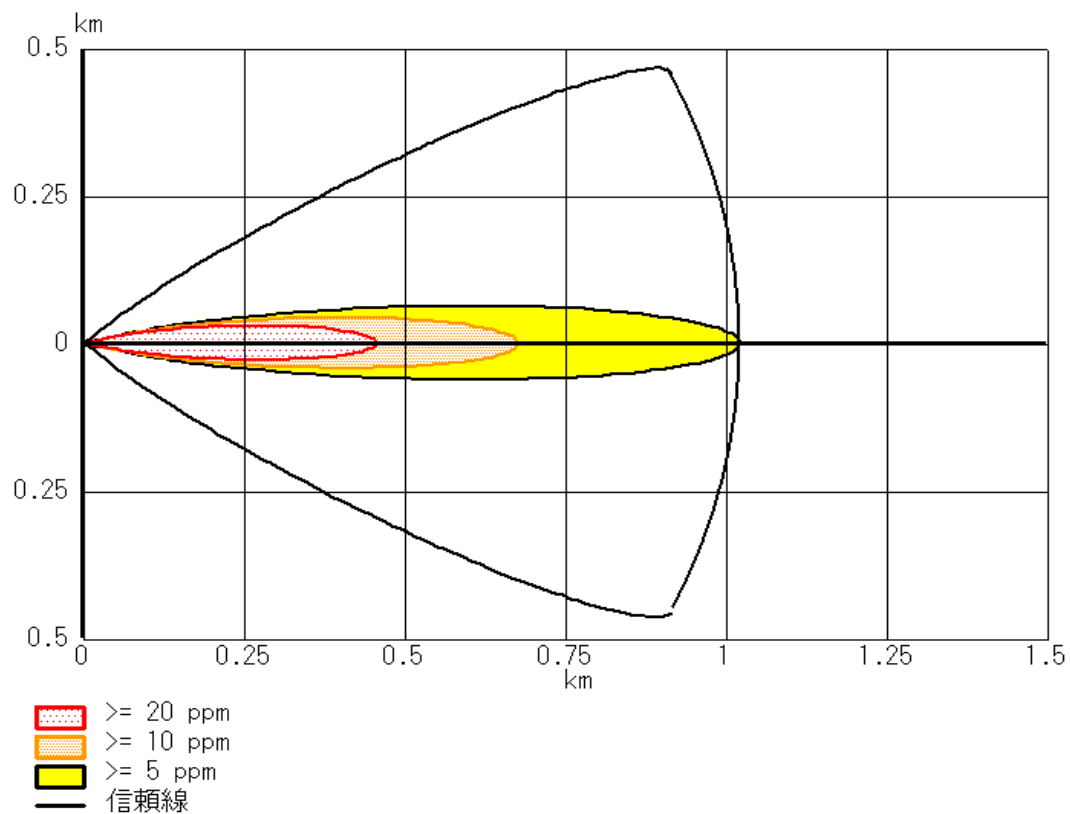


図 1.2.2 塩素ガス拡散の算定結果（大気安定）

[ガウシアンモデル]



[重いガスのモデル]

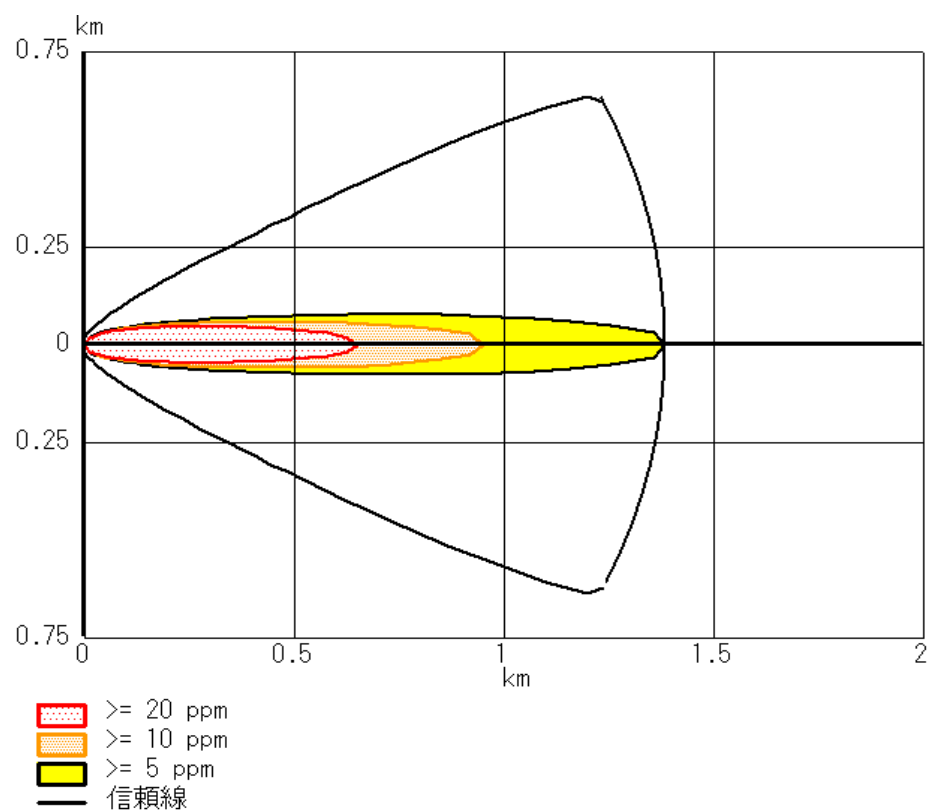
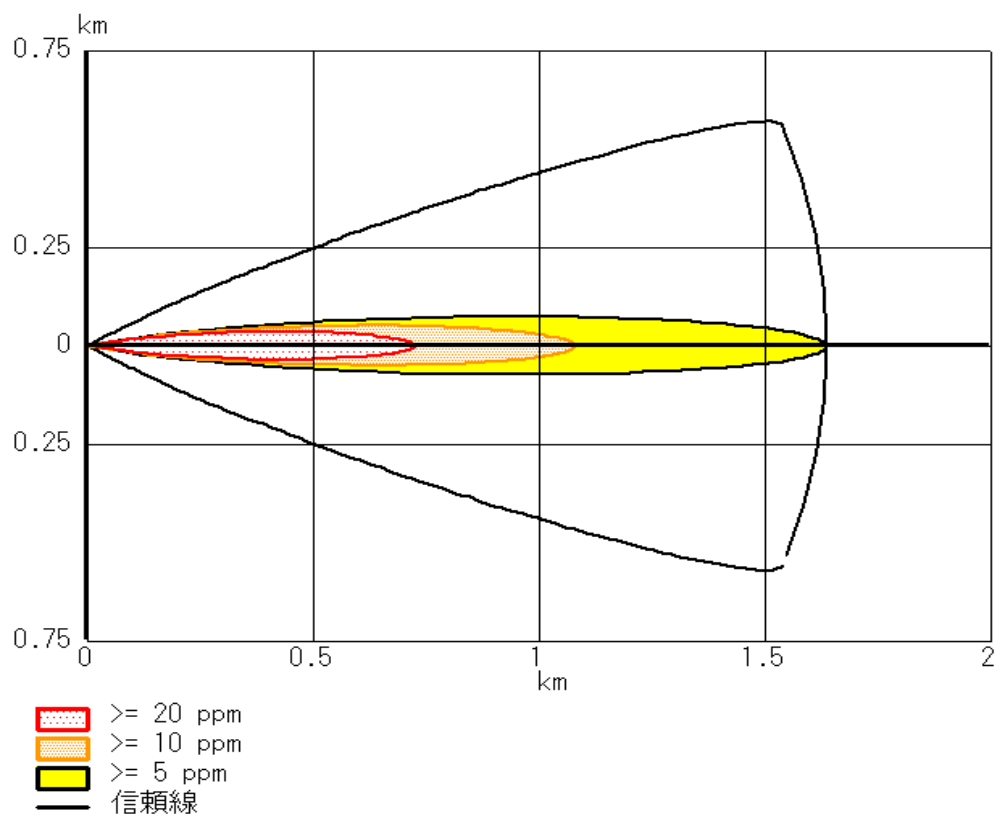


図 1.2.3 ALOHA による塩素ガス拡散の算定結果（大気安定度 D）

[ガウシアンモデル]



[重いガスのモデル]

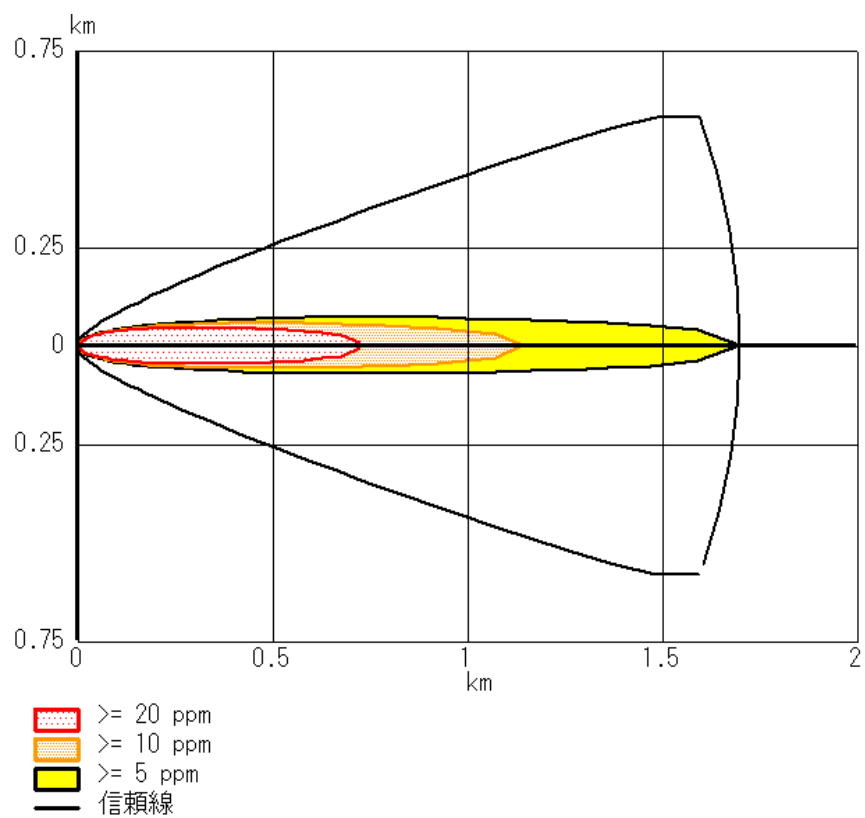
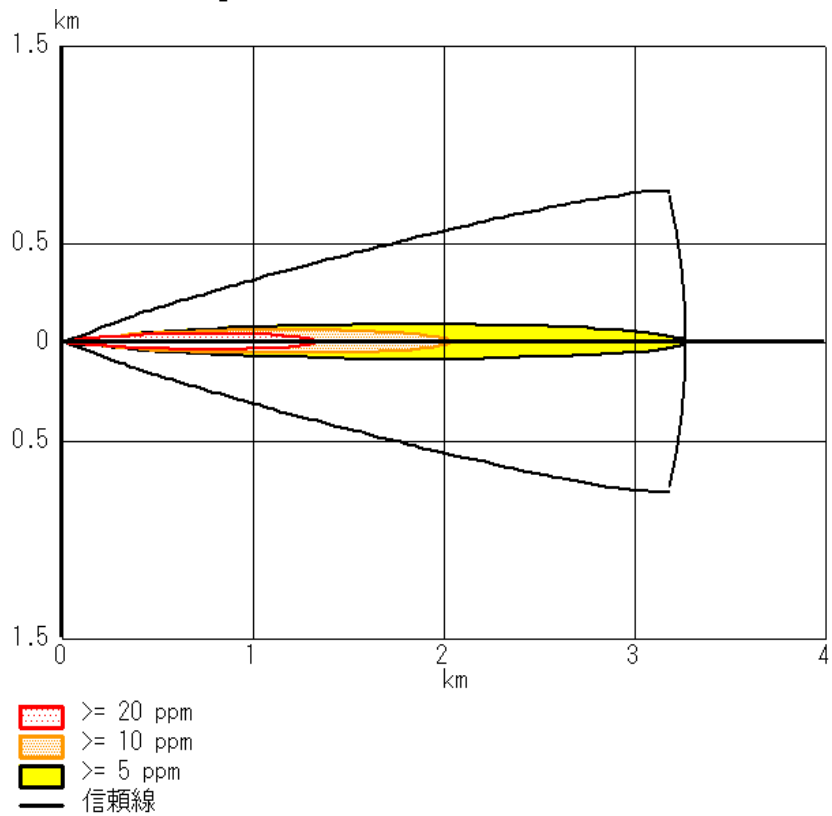


図 1.2.4 ALOHA による塩素ガス拡散の算定結果（大気安定度 E）

[ガウシアンモデル]



[重いガスのモデル]

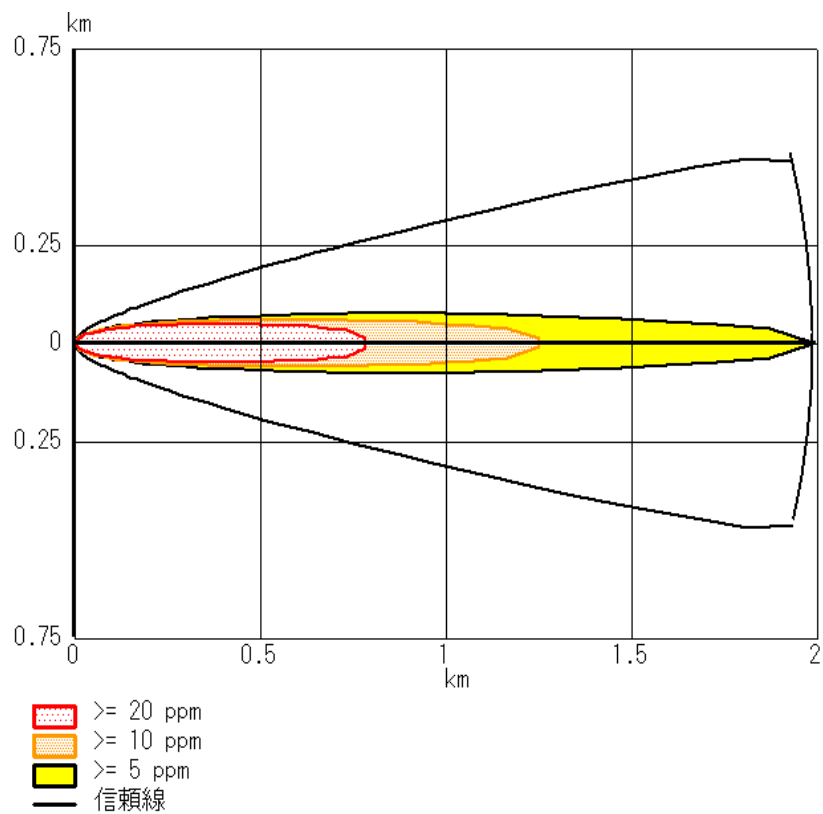


図 1.2.5 ALOHA による塩素ガス拡散の算定結果（大気安定度 F）

【ガス拡散モデルについて】

坂上のガス拡散モデルはガスが風に乗って拡散するような場合を想定したモデルであり、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。水素のように空気よりも非常に軽いガスの場合は漏洩後すぐに上方へ拡散し、逆に重いガスの場合には下方へ拡散するが、このような違いは考慮できない点に注意が必要である。

近年では、無償で使用可能なソフトウェアも公開されていることから、以下に紹介する。

■ ALOHA (米国環境保護庁(EPA)、米国海洋大気庁(NOAA))

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。

1) 参照: 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター ホームページ

http://www.anshin.ynu.ac.jp/renkei/infoplat/tools_physicalrisk.html

■ METI-LIS (経済産業省 - 低煙源工場拡散モデル)

有害大気汚染物質の環境予測評価を目的として開発された大気拡散モデル。地上付近の排出源を想定し、建屋等の影響を考慮したモデルである。対象物質は、ベンゼン、トリクロロエチレン等、短時間暴露で毒性のあるものや大気中で反応、消滅しない物質である。

2) 参照: 社団法人 産業環境管理協会 ホームページ

http://www.jemai.or.jp/CACHE/tech_details_detailobj1816.cfm

基準値について

災害の影響度の基準値は、火災の放射熱、爆風圧、可燃性ガスや毒性ガスの拡散などが人体に与える影響に基づき設定する。ここでは、災害による人体等への影響（急性影響）について、既往文献に示されているデータを整理する。

1．火災による放射熱

(1) 放射熱強度

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。

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許容限界として 2.3kW/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。これは、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。

また、地震時の市街地大火に対する避難計画において、 2.4kW/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（長谷見・重川,1981）。

表 2.1.1 放射熱の影響

放射熱強度		状況および説明	出典
(kW/m^2)	($\text{kcal/m}^2\text{h}$)		
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 消防庁指針(H13)に示されている液面火災の基準値	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。皮膚に水泡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(赤く斑点ができ水泡が生じる)を負う	5)
11.6	10,000	消防庁指針(H13)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)	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)

(2) 放射熱強度と時間との関係

消防庁の旧指針^{*)}には、火傷や発火を起こす放射強度 E (W/m^2) と暴露時間 T (s) との関係として次式が示されている。

$$E = A \times T^n$$

*) 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，平成 6 年

ここで、 A 、 n は表 2.1.2 に示す係数である。これによると、火傷及び痛みを引き起こす暴露時間と放射強度は表 2.1.3 のようになる。現指針に示されているファイヤーボールの基準値 ($11.6kW/m^2$) は、約 10 秒で火傷を起こす強度となる。

表 2.1.2 各条件における A 及び n の係数の例

条 件	A	n
火傷 ^{※1}	6.0×10^4	-0.725
痛み ^{※1}	2.0×10^4	-0.562
桜の発火 ^{※1}	43.0×10^4	-0.482
杉の発火 ^{※1}	29.1×10^4	-0.434
繊維板の発火 ^{※1}	14.2×10^4	-0.323
桜、杉及びアクリルの引火 ^{※2}	12.8×10^4	-0.398
ボード ^{※2} (厚さ 4.8mm) の引火 ^{※2}	22.0×10^4	-0.422
インシュレーション ^{※2} (厚さ 12.0mm) の引火 ^{※2}	10.4×10^4	-0.428
パーティクル ^{※2} (厚さ 12.0mm) の引火 ^{※2}	21.4×10^4	-0.447
メタクリル樹脂板 (厚さ 3.8mm) の引火 ^{※2}	27.7×10^4	-0.512
ナイロン ^{※2} (厚さ 7.0mm) の引火 ^{※2}	38.5×10^4	-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¹⁾から、近似値により算出した値。

表 2.1.3 放射強度と暴露時間との関係

暴露時間 (s)	放射強度・火傷 (kW/m ²)	放射強度・痛み (kW/m ²)
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

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暴露時間が示されている。

これはストール曲線と呼ばれ、米国では防護服の熱の防護性能の基準として用いられている。日本においても、JIS8024:2009「熱及び火炎に対する防護服 - 火炎及び放射熱暴露時の熱伝達性測定方法」において採用されている。

*) STOLL, A.M. and CHIANTA, M.A., Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. Aerospace Medicine, 40, 1969, pp. 1232-1238

図 2.1.1 は、旧指針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と、ストール曲線とをあわせて示したものである。

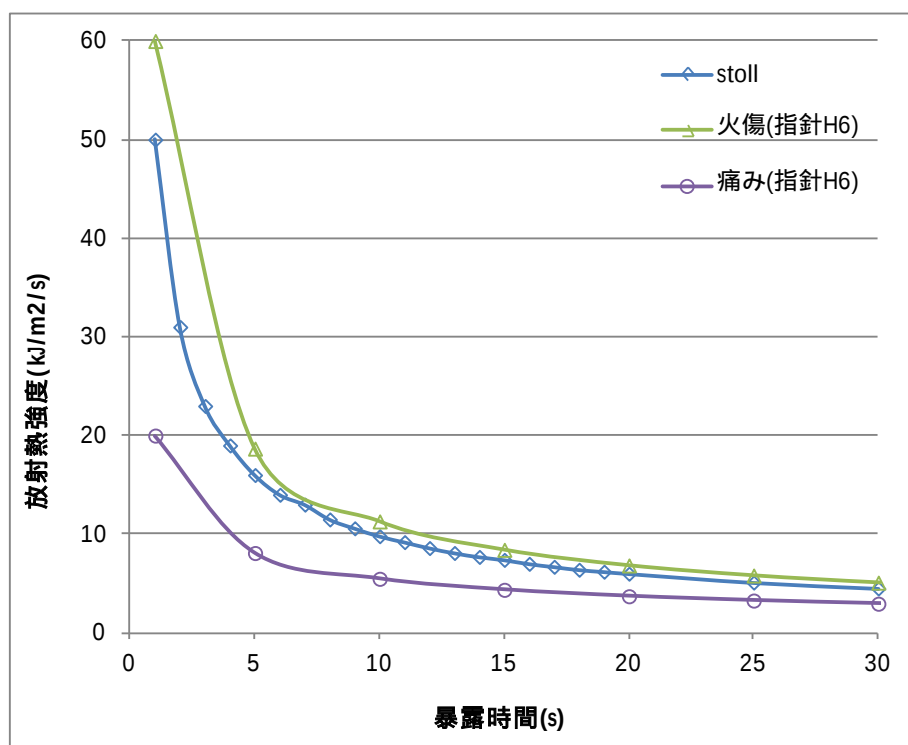


図 2.1.1 人体への放射熱の影響

2 . 爆風圧

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 kPa (0.12kgf/cm²) 新規製造施設に対する限界値を 9.8 kPa (0.1kgf/cm²) 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、消防庁指針でもこの値を採用している。

ガス爆発（蒸気雲爆発）に伴う爆風圧の影響の程度について、示されている文献値を表 2.2.1 及び 2.2.2 に示す。

表 2.2.1 爆風圧の影響 (その 1)

■ 木造建築物

爆風圧		影響内容
Pa	kgf/m ²	
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

■ 人体

爆風圧		影響内容
Pa	kgf/m ²	
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

（出典）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，平成 6 年

表 2.2.2 爆風圧の影響(その2)

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ク壁が破壊される
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
210	クレータの縁ができる限界

(出典) V.J.Clancy : Diagnostic Feature of Explosion Damage, Sixth International Meeting of Forensic Science, Edinburgh. (1972)

3 . 毒性ガスの拡散濃度

急性毒性の許容濃度に関しては、国外のいくつかの機関において示されている基準値がある。一例として、表 2.3.1 にいくつかの基準値の概要を示す。表 2.3.2 には、主な毒性物質の IDLH 濃度を示す。

表 2.3.1 急性毒性の許容濃度の基準

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。*) 消防庁指針 (H13) に示されている。
TLV-STEL(Short-term exposure limit)	米国産業衛生専門家会議(American Conference of Industrial Hygienists: ACGIH)	15 分間継続的に曝露しても、耐えられないほどの刺激、慢性的または非可逆的な生体組織の損傷、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。
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)	AEGLs 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。

*) NIOSH ホームページ (<http://www.cdc.gov/niosh/idlh/idlhintr.html>)

表 2.3.2 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	トリエジン	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(ホスゲン)	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		

各基準値の違いは、塩素を例にとると表 2.3.3 のようになる。

表 2.3.3 塩素の急性毒性に関する許容濃度

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

- 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ない可逆的影響を増大させる空气中濃度閾値である。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气中濃度閾値である。
- 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气中濃度閾値である。

AEGL 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、AEGL 値は米国 EPA の AEGL HP (<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

*) 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>)

- ERPG-1:全ての人間に対する基準。60 分間の曝露で、不快感やわずかな刺激が生じない空气中の最大濃度
- ERPG-2:60 分間曝露しても、恒久的な健康影響や保護具着用などの行動能力の低下が生じない空气中の最大濃度
- ERPG-3:60 分間の曝露で、致死もしくは恒久的な障害が生じない空气中の最大濃度

指針の見直しに向けて

1. 解析モデルに関して

これまでの検討から、現指針における爆発・ファイヤーボール及びガス拡散の解析モデルに関して次のようなことがいえる。

爆風圧については、事故事例に基づいた試算結果から、現指針で例示されている TNT 等価法により概ね妥当な評価を行うことが可能である。

容器破裂による影響については、特定のプラントを対象とした個別評価であれば、反応プロセス（異常反応の可能性）や容器の破裂圧力を推定して算定することが可能であるが、コンビナートアセスのような数多くの施設を対象とした評価では困難と考えられる。これについては、TNT 等価法による評価の適用が考えられる（可燃性ガスタンクあるいはプラント塔槽類（容器）の破損により内容物が漏洩して開放空間で可燃性蒸気雲を形成、これに着火することによる爆発を前提とする）。仮にプラント塔槽類の中に 10 t 程度の可燃性ガス（常温のプロパン相当）が滞留しており、これが全量漏洩すると考えると、前述の三井化学の爆発事故で試算した破裂エネルギー（TNT 当量）とほぼ同等のエネルギーとなり、内部に可燃性ガスが滞留する通常の石油精製、石油化学プラントにおいては、漏洩爆発を前提として評価することにより、破裂したときの影響も包含できると考えられる。

BLEVE によるファイヤーボールの直径及び継続時間については、現指針で例示されているモデルで概ね妥当な評価を行うことができる。なお、AIChE のモデルも同様に妥当な結果を与えることから併記してもよい（継続時間については AIChE のモデルの方が適合性がよいように思われる）。

ファイヤーボールによる放射熱については、事故事例に基づいた検討はできないが、複数のモデルによる算定結果を比較すると、現指針で例示されたモデルはかなり大きめの値を与えるようである。これはファイヤーボールの温度を 1750 K と高く見積もっていることが大きく影響していると考えられる。

*) 長谷川・佐藤は n-ペンタンのファイヤーボールの実験で 1150～1520K という温度を得ているが、アセスメントで適用する温度は 1750K で良いか。

飛散物については、初速度や飛散距離の推定に容器の重量、破裂圧力だけでなく、飛散物の数、重量、大きさや形状など多くの条件を仮定する必要があるが、コンビナートアセスのような事前評価において実用的とは言い難く、検討が必用な場合には事故事例に基づいたほうがよいと考えられる（現指針では示されていない）。

ガス拡散について、現指針で示されている坂上モデルは、出現頻度が高い大気安定度が「中立（Pusquill の安定度区分で D ～ E ）のときには、米国 EPA 開発の影響評価ツール（ALOHA）とも比較的近い濃度値を与えることから、コンビナートアセスにおいてこのモデルを適用することは妥当と考えられる。ただし、大気安定度を「安定」とした場合には、過大な評価結果を与える可能性もあり注意が必要である（大気安定度が「やや不安定」及び「不安定」の場合は拡散濃度は小さくなり、影響評価ではあまり用いられない）。

以上から、現指針に示されている解析モデルは概ね妥当であり、適用にあたって注意の必要な事項はあるが、特に変更の必要はないと考えられる。

2．基準値に関して

災害の影響範囲の大きさは、解析モデル（開口部の大きさなど算定条件も含めて）と影響強度の基準値によって決まる。基準値に関して、現指針による記載内容と見直しが必要と考えられる事項を以下に示す。

(1) 液面火災の放射熱

〔現指針の記載〕

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。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許容限界として $2324 \text{ J/m}^2\text{s}$ （ $2000\text{kcal/m}^2\text{h}$ ）程度の値が用いられることが多い。これは、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。なお、地震時の市街地大火に対する避難計画では、一般に $2383\text{J/m}^2\text{s}$ （ $2,050\text{kcal/m}^2\text{h}$ ）が用いられており、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。

*) 長谷見雄二・重川希志依：火災時における人体の耐放射熱限界について，日本火災学界論文集，Vol.31, No.1, 1981

〔見直し〕

基準値自体には問題はないと考えられる。旧単位系で切れの良い $2,000\text{kcal/m}^2\text{h}$ としており、これを国際単位系に変換したため端数が出ており、 2.3kW/m^2 （ $2.3\text{kJ/m}^2\text{s}$ ）としてよい（旧単位系との併記は止める）。

(2) ファイヤーボールの放射熱

〔現指針の記載〕

ファイヤーボールの継続時間は爆発に寄与するガスの量に依存し、通常想定されるような事故

では数秒以下と考えられる。このことを考慮して、ファイヤーボールの放射熱に対する許容限界として、 $11620\text{J/m}^2\text{s}$ ($10000\text{kcal/m}^2\text{h}$)程度の値を用いることが妥当と考えられる。

[見直し]

東日本大震災では、コスモ石油のLPG爆発に伴うファイヤーボールは20秒程度継続していることから、想定災害の規模(ファイヤーボールの継続時間)に応じて $5\sim 10\text{kW/m}^2$ を基準値としたほうがよいと考えられる。

(3) 爆風圧

[現指針の記載]

ガス爆発に伴う爆風圧については、高圧ガス保安法・コンビナート等保安規則で、爆風圧の限界値を既存製造施設に対して 11.7kPa (0.12kgf/cm^2)、新設製造施設に対して 9.8kPa (0.1kgf/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、防災アセスメントにおいてもこの程度の値を許容限界とすることが妥当である。

[見直し]

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。コスモLPG爆発などの事象事例を見ると、計算上現指針の基準値を下回ると思われる範囲でも、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、爆風圧の基準値は、現指針に示された値よりも小さい(安全側の)値を用いたほうがよいと考えられる。例えば、多く引用されているClancey(1972)による爆風圧と被害の関係によると次のような記述がある。

- 7kPa : 住めなくなる程度に家屋の一部が破損する
- 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)

これらの記述と、コスモ石油LPG爆発による爆風圧の影響(表1.1.4)を考慮すると、基準値としては $2\sim 5\text{kPa}$ 程度の値が妥当と考えられる。例えば「水素スタンドに係る安全性評価と安全対策検討」では、旧消防庁指針の記述(Clanceyらの引用)をもとに、リスク評価を行うときの影響度ランクを表3.2.1のように設定している。

表 3.2.1 水素スタンドの安全性評価における爆風圧の影響度ランク

影響度 ランク		設備的被害		人的被害	
		設備的被害	爆風圧 (kPa)	人的被害	爆風圧 (kPa)
I	極めて 重大な 災害	敷地外の隣接建屋が全壊 する程度の極めて重大な 災害	34 以上	周辺住民、歩行者の死亡災害 （「敷地外で死亡者」と同意）	100 以上
II	重大な 災害	敷地外の隣接建屋が半壊 する程度の重大な災害	6.9～ 34	顧客、従業員の死亡災害 （「敷地内で死亡者」と同意）	100 以上
III	中規模 災害	敷地外の隣接建屋の窓ガラ スは大小に関わらず壊 れ、窓枠にも被害が及ぶ 程度の中規模災害	3.4～ 6.9	（周辺住民、歩行者、顧客、 従業員を問わず） 入院が必要な重傷災害	16～ 100
IV	小規模 災害	敷地外の隣接建屋の一部 の窓ガラスが破損する程 度の小規模災害	1～3.4	（周辺住民、歩行者、顧客、 従業員を問わず） 通院を伴う休業災害	2～16
V	軽微な 災害	敷地外の隣接建屋に影響 なし	1 未満	（周辺住民、歩行者、顧客、 従業員を問わず） 通院を伴わない軽微な災害	2 未満

(4) フラッシュ火災

[現指針の記載]

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災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。可燃性ガスが漏えい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。

[見直し]

なし。

(5) 毒性ガス拡散

[現指針の記載]

急性毒性に対する毒性物質の許容濃度として TLV-STEL、IDLH などがよく用られる。TLV-STEL(Short Term Exposure Limit)は、ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 米国産業衛生監督者会議)が提唱している短時間曝露限界で、15 分間継続的に曝露しても、耐えられないほどの刺激、慢性的または非可逆的な生体組織の損傷、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。IDLH(Immediate Dangerous to Life and Health)は、NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health, 国立労働安全衛生研究所)が提唱する限界値で、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を意味する。コンビナート施設から毒性ガスが洩れた場合、周辺の人間に対する限界濃度は、ガスの性状や曝露時間などを考慮して決める必要があるが、周辺の住民の避難を前提として上記の IDLH を限界濃度として用いることが妥当と考えられる。

[見直し]

アセスメントにおいて IDLH を適用することは問題ないと考えられるが、毒性物質の曝露時間を考慮し、AEGLs 等の基準値を用いることも可能である。

例えば、現指針が出された後、全米 AEGL 開発諮問委員会によって、公衆に対する次の 3 段階の許容レベル (AEGLs) 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气中濃度閾値である。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气中濃度閾値である。
- 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气中濃度閾値である。

塩素の AEGLs を表 3.2.2 に示す (IDLH は 10ppm)。このように、AEGLs は公衆を対象としているということのほかに曝露時間も考慮されており、防災アセスメントに適していると考えられる。

表 3.2.2 塩素の AEGLs

Chlorine 7782-50-5 (Final)					
ppm					
	10 min	30 min	60 min	4 hr	8 hr
AEGL 1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
AEGL 2	2.8	2.8	2.0	1.0	0.71
AEGL 3	50	28	20	10	7.1

今後の防災アセスメントの実施イメージ

(注) 本資料は、指針改訂の検討にあたっての参考資料として、今後の防災アセスメントの実施イメージ(地震時を中心に)を示したものです。本資料はあくまで一例であり、今後各自治体において防災アセスメントを実施する際は、各地域の実情を踏まえた検討が必要と考えられます。

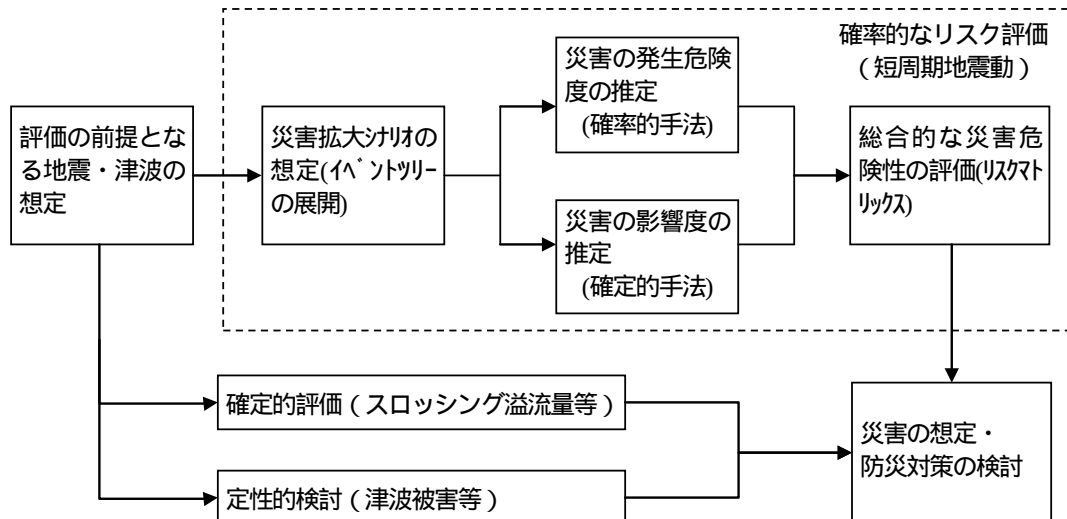


図 地震時の被害を対象とした防災アセスメントの実施イメージ

1 地震・津波の想定

(1) 防災アセスメントにおいて前提とする地震・津波

防災基本計画(2011.12)

- 国及び地方公共団体は、地震災害対策の検討に当たり、科学的知見を踏まえ、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震/津波を想定し、その想定結果に基づき対策を推進するものとする。
- 津波災害対策の検討に当たっては、以下の二つのレベルの津波を想定することを基本とする。
 - ・ 発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波
 - ・ 最大クラスの津波に比べて発生頻度が高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波

参照：(別添) 国における検討状況

自治体における地震・津波想定の方の整理

- 従来の想定地震に加え、最大クラスの地震を想定
各地域の最大クラスの地震については、今後の調査研究成果を踏まえて想定されるものと考えられる。

○ 津波については、2つのレベルの津波を想定

1) 発生頻度の低い最大クラスの津波

中央防災会議において南海トラフの巨大地震による津波高・浸水予測結果が公表されたところであり、相模トラフ沿いの巨大地震についても現在検討が行われているところである。ⁱ

また、都道府県においては、「津波防災地域づくりに関する法律」に基づき、今後最大クラスの津波を想定して津波浸水シミュレーションを実施することとなる。ⁱⁱ

2) 発生頻度の高い津波

「南海トラフの巨大地震モデル検討会」による第二次報告では、「発生頻度の高い津波」の考え方について、以下のように示されている。ⁱⁱⁱ

- ・中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」(2003)の検討による震度分布と津波高は、南海トラフ沿いで1707年宝永地震以降の過去数百年間に発生した地震による震度分布・津波高の最大値であり、いわゆる「既往最大値」と考えることができる。
- ・南海トラフ沿いで発生した過去1000年の地震の履歴から、地震は約100～150年の間隔で繰り返し発生している。その中で、中央防災会議(2003)の津波高のような、ある程度大きな津波を伴う地震の発生間隔は300～500年である。
- ・農林水産省・国土交通省の海岸管理者への通知「設計津波の水位の設定方法等について」では、一定の頻度(数十年から百数十年に一度程度)で発生する津波の高さを想定し、海岸管理者が堤防の設計を行うこととしている。
- ・地域によっては1707年宝永地震以外の地震による津波のほうが大きくなることや、津波の発生間隔及び、津波資料の少なさやばらつき等も考慮すると、これら津波は防災対策を検討する際に特別に区分することなく検討対象とすることが望ましい。
- ・従って、南海トラフでの発生頻度の高い津波の検討においては、中央防災会議(2003)の津波高等の資料に加え、過去の地震の津波高の資料、必要に応じて行うシミュレーション等を参考にし、各地域において隣接地域とも調整を図り、「発生頻度の高い津波」の津波高等が設定されることになる。

防災アセスメントで前提とする地震・津波の考え方

【従来】

- 自治体の地震被害想定調査結果等に基づき、コンビナートに最も影響を及ぼすと考えられる地震・津波を想定
- 国による最新の成果が得られている場合には、その適用についても検討
- 適当な地震動予測結果がない場合には、コンビナートの地震動予測を実施

【今後】

- 原則として自治体の地震動予測結果、津波浸水予測結果に基づく。

ⁱ 中央防災会議「南海トラフの巨大地震モデル検討会」、「防災対策推進検討会 首都直下地震対策検討ワーキンググループ」

ⁱⁱ 内閣府・国土交通省通知(平成24年3月9日)「津波防災地域づくりに関する法律等の施行について」

ⁱⁱⁱ 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告) 津波断層モデル編(参考資料) 南海トラフにおける発生頻度の高い津波の基本的な考え方、平成24年8月29日

○必要に応じて下記について検討。

- ・コンビナートの状況（地盤データ等）を反映した詳細検討
- ・地震危険性の低い地域については、M6.9 直下型地震（活断層が地表で認められない地震規模の上限）を想定^{iv}
- ・確率論的地震動予測地図（地震調査研究推進本部、防災科学技術研究所）の活用

確率論的地震動予測地図とは、対象地域に影響を及ぼすおそれのある全ての地震を考慮し、予想される地震動の強さを、確率を用いて表現したものである。地震動強さ・期間・確率の3つのパラメータのうち2つを固定することにより、残る1つのパラメータの分布を表すことができる（例えば、今後50年間に一定の確率（2%、5%、10%、39%）でその値以上の揺れに見舞われる震度の分布図）。

地震調査研究推進本部では「新たな地震調査研究の推進について」^vにおいて、これまでの成果をリスク評価に生かすことの重要性も指摘しているが、自治体の地震被害想定が地震の発生に関して確率論的評価手法を採用していないことから、防災アセスメントへの適用については今後の議論が必要と考えられる（下記「(2)地震時の災害発生危険度推定にあたっての地震発生頻度の取扱い」を参照）。

○長周期地震動については、海溝型の巨大地震のように、地震動の長周期成分を多く含む地震を想定する必要がある。現在、地震調査研究推進本部において、南海トラフの巨大地震、相模トラフ沿いの巨大地震の長周期地震動予測地図の作成が行われている。

（2）地震時の災害発生危険度推定にあたっての地震発生頻度の取扱い

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）として表わすことにより確率的評価を行うが、地震時の災害発生危険度に関しては、次の2通りの表現方法が考えられる。

想定される地震が発生したときの被害確率として表わす（地震の発生頻度を考慮しない）。

想定地震の発生頻度（/年）を考慮して、これを上記の被害確率に乗じることにより、平常時と同様に1年あたりの発生頻度（/年）として表わす。

現在、地震ハザードステーション（J-SHIS）^{vi}において公開されている確率論的地震動予測地図を用いればの表現は可能であり、これにより平常時と地震時で同じ次元で評価することができる。しかし、都道府県が実施する地震被害想定及び地域防災計画では地震を確定的に扱っており、地震の発生頻度は考慮していない。

地域防災計画と石油コンビナート地区の防災計画は本来一体をなすべきものであることから、防災アセスメントにおいては、地震発生頻度を考慮しないの表現を用いることとし、想定地震は地震被害想定調査に基づくことを原則とする。なお、今後の地震調査研究の進捗やその成果活用の動向を踏まえて、評価方法の見直しについて検討していくことが適当と考えられる。

^{iv} 例えば、中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」：中部圏・近畿圏の内陸地震に関する報告，平成20年12月

^v 地震調査研究推進本部：新たな地震調査研究の推進について - 地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策 - ，平成21年4月21日（平成24年9月6日改訂）

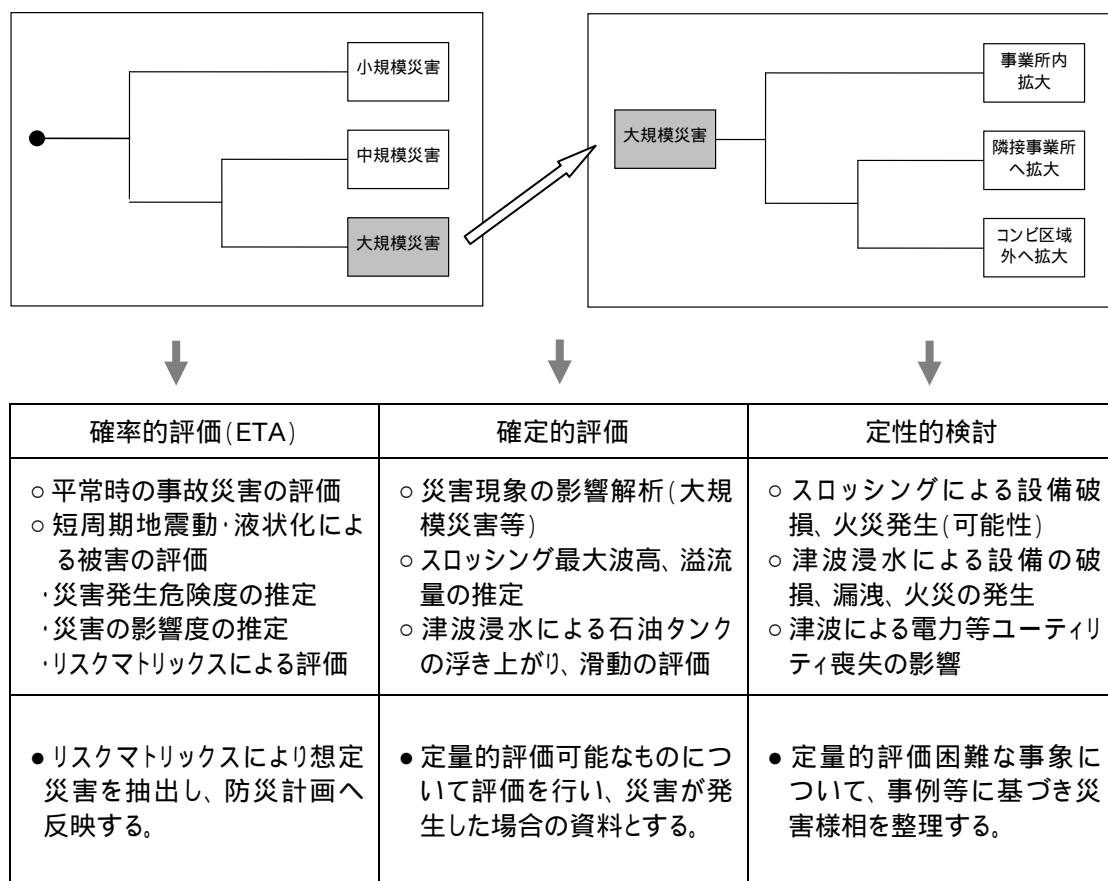
^{vi} 地震ハザードステーション J-SHIS，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>

2 評価対象とする災害事象とリスク評価手法

東日本大震災をはじめとする近年の石油コンビナートにおける災害事例から、想定外の大規模災害の危険性が指摘されている。このような状況を踏まえ、今回の調査検討では、防災アセスメントで評価対象とする災害事象の見直しを行い、より実態に近いシナリオの提示を検討しているところである。

ただし、現指針に一例として示されている災害の発生・拡大シナリオは、イベントツリー解析（ETA）に基づく確率的な評価を前提としていることから、このような評価が困難な災害事象については、その評価方法の検討が必要である。

現指針では、個々の施設についての災害拡大シナリオを前提として、ETA による確率的評価手法を提示しているが、隣接施設や事業所に影響が及ぶような大規模災害、コンビナートの全域に被害拡大するような津波災害については、確率的評価手法の適用は困難であり、別途に確定的評価あるいは定性的な検討による災害想定が必要となる。



津波被害などの定性的検討による災害は、現状においては評価手法が確立されていないような災害である。従って、国等における今後の調査研究成果を踏まえ、随時評価方法の見直しを図っていく必要がある。

3 想定災害の抽出と想定災害を前提とした対策の考え方

(1) リスクマトリックスによる想定災害の抽出

○ 石油タンクのリスクマトリックスの例

(流出火災、タンク火災)

	E	D	C	B	A
防油堤内 流出火災					
タンク 全面火災		仕切堤内 流出火災			
		リング火災			
			中量 流出火災		
			タンク 小火災	小量 流出火災	

○ コンビナート全体のリスクマトリックスの例

(石油タンクの防油堤内流出火災)

	E	D	C	B	A
	69	36	14		
	245	124	13		
	189	55	7		
	59	7			

*数字は施設数

発生危険度（地震発生時）

- ・ A : 10^{-2} 程度
- ・ B : 10^{-3} 程度
- ・ C : 10^{-4} 程度
- ・ D : 10^{-5} 程度
- ・ E : 10^{-6} 以下

影響度（距離）

- ・ : 200m ~
- ・ : 100 ~ 200m
- ・ : 50 ~ 100m
- ・ : 20 ~ 50m
- ・ : ~ 20m

上図はリスクマトリックスを用いた評価例である。防災計画における想定災害は、例えば次のように抽出する。

○ 災害の発生危険度がCレベル以上の災害

- 現実的に起こりうると考えて対策を検討しておくべき災害
- 影響度が大きい(、レベル)ものは対策上の優先度が高い

また、リスクマトリックス上低頻度で影響度の大きい災害については、次のような考え方により、災害の影響度を把握しておくことが必要と考えられる。

○ 災害の発生危険度がD、Eレベルで影響度がレベルの災害

- 発生する可能性が極めて小さい災害を含むが、万一に備え影響度を把握しておくべき災害

抽出した想定災害は、防災計画における想定災害に反映される。さらに、想定災害を前提とした予防対策計画、応急対策計画等への反映も考えられる。

想定災害の抽出基準をどのように設定するかは、評価を行う自治体が地域の状況を勘案して決定することになる。

消防庁の旧指針（平成6年）においては、想定災害の抽出基準に関して、発生頻度が 10^{-6} /年以上（平常時）という目安が示されていた。その後、平成13年に改訂された現指針では特に数値の

目安は示さずに、発生危険度と影響度の双方を考慮して、相対的にリスクが大きい災害を想定するとしている。これは、頻度推定に不確定要素が多いこと、災害想定には対象地域の特性を考慮する必要があることなどの理由によるもので、 10^{-6} /年という目安に問題があるわけではない。

地震時については、例えば発生頻度が 10^{-2} /年程度の地震を想定した場合、災害の発生確率が 10^{-4} 程度以上の災害を抽出すると、平常時と同程度の抽出基準となる。

注) アセスメント結果の捉え方について

アセスメント結果は相対的評価の意味合いが強く、防災対策実施にあたっての各施設の優先度を表すものと位置付けられる。実際には、アセスメントで想定している条件以外での災害が起こり得ることから、各施設における具体的対策の検討にあたっては、各々の事業所における状況を反映したより詳細な検討を行い、改めて当該施設の災害の危険性を確認する必要がある。

(2) その他の災害

- 長周期地震動によるスロッシング被害
- 津波による石油タンクの被害
- 定性的検討による想定災害

上記の災害は、確率的な評価が適当でない（あるいは適用できない）災害であり、このような災害に対しては、それぞれの災害の特性に応じた検討が必要である。

(参考) 津波対策の基本方針

防災基本計画(2011.12)

災害の発生を完全に防ぐことは不可能であることから、災害時の被害を最小化する「減災」の考え方を防災の基本方針とする。

- 発生頻度が低い最大クラスの津波に対しては、住民等の生命を守ることを最優先として、地域の状況に応じた総合的な対策を講じるものとする。
- 発生頻度の高い津波に対しては、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、海岸保全施設等の整備を進めるものとする。

経済産業省(2012.4)^{vii}

(高圧ガス施設について)

- 発生頻度が低い最大クラスの津波に対しては、事業所内の従業員等の生命の保護の他、高圧ガス施設が津波で被害を受けたとしても、周辺の住民の生命が保護されることが必要である。
- 発生頻度の高い津波に対しては、事業所内の従業員等の人命の保護に加え、津波の到達により高圧ガス設備等に被害を受けても、周辺住民に対して被害を及ぼす災害等を発生させないことが必要である。

^{vii} 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、平成 24 年 4 月

	地震	津波
	(考え方) 今後、地震・津波の想定を行うにあたっては、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波を検討していくべきである。	
	中央防災会議 【東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告】 (2011.9.29)	(津波対策の基本方針) ①発生頻度は高く、津波高は低いものの、大きな被害をもたらす津波に対しては、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、海岸保全施設等を整備して被害を抑制。 ②発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波に対しては、住民等の生命を守ることを最優先とし、住民の避難を軸に、とりうる手段を尽くした総合的な津波対策を確立。 ★東北地方太平洋沖地震による津波はこれに相当
	中央防災会議 【南海トラフの巨大地震モデル検討会】 (1次報告:2012.3.31) (2次報告:2012.8.29)	(最大クラスの地震・津波想定) 震度分布及び津波高の最大値を包絡したものを、「最大クラスの震度分布及び津波高」とする。 ○予防対策:各想定ケースの最大値の重ね合わせ ○応急対策:想定ケース毎「代表的なパターン」とする。
内閣府	中央防災会議 【防災対策推進検討会議・首都直下地震モデル検討会】	(発生頻度の高い津波想定) 南海トラフにおける「発生頻度の高い津波」は、中央防災会議(2003)の津波高等の資料に加え、過去の地震の津波高の資料、必要に応じて行うシミュレーション等を参考にし、各地域において隣接地域とも調整を図り津波高等が設定されることになる。
	中央防災会議 【防災対策推進検討会議・首都直下地震モデル検討会】	(想定する地震・津波) 最新の科学的知見を踏まえ、これまでの18タイプのマグニチュード7クラスの首都直下地震の見直しと、相模トラフ沿いで発生する最大クラスの地震・津波を新たに想定対象に加えた検討が進められている。
	災害対策基本法改正 (2012.6) ↓ 【防災基本計画】修正 (2011.12、2012.9)	(考え方) 災害の発生を完全に防ぐことは不可能であることから、災害時の被害を最小化する「減災」の考え方を防災の基本方針とし、たとえ被災したとしても人命が失われないことを最重視し、また経済的被害ができるだけ少なくなるよう、さまざまな対策を組み合わせて災害に備えなければならぬ。 (想定する地震・津波) 国及び地方公共団体は、地震災害対策の検討に当たり、科学的知見を踏まえ、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震・津波を想定し、その想定結果に基づき対策を推進するものとする。
国交省	【教訓】 ↓ 津波防災地域づくりに関する法律 (2011.12.27施行)	(津波対策の基本方針) ①最大クラスの津波に比べて発生頻度が高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波に対しては、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、海岸保全施設等の整備を進めるものとする。 ②発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波に対しては、住民等の生命を守ることを最優先として、地域の状況に応じた総合的な対策を講じるものとする。
経産省	【防災基本計画】 ↓ 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 (2012.4)	(最大クラスの津波想定) 都道府県知事が、最大クラスの津波を想定し、悪条件下を前提に浸水の区域及び水深を設定する(津波浸水シミュレーションの実施)。
		(津波対策の基本方針) ①発生頻度が高い津波に対しては、事業所内の従業員等の人命の保護に加え、津波の到達により高圧ガス設備等に被害を受けても、周辺住民に対して被害を及ぼす災害等を発生させないことが必要である。 ②最大クラスの津波に対しては、事業所内の従業員等の生命の保護の他、高圧ガス施設が津波で被害を受けたとしても、周辺の住民の生命が保護されることが必要である。
消防庁	消防特第63号 特定防災施設等及び防災資機材等に係る地震対策及び津波対策の推進について(通知) (2012.3.30)	(津波対策の基本方針) ①発生頻度が高い津波に対しては、大津波警報及び津波注意報が解除され、瓦礫や汚泥等が除去され時定事業所内に入ることが可能となった後、施設・資機材等を直ちに復旧できるようにするために、施設・設備等の浸水対策を講ずるとともに、応急措置の準備をしておくこと。 ②最大クラスの津波に対しては、応急措置又は代替措置により、速やかに被害が発生する前と同程度の機能を回復することができるように機能回復のための計画を策定しておくこと。

「石油コンビナートの防災アセスメント指針」 の改訂について（案）

（注）本資料は暫定版であり、内容については今後修正の可能性があります。

* 本資料は、現指針（平成 13 年）をベースに、以下の追加修正を加えたものです。

下線：追加・修正事項

斜体：注記及び要検討事項

現指針の目次構成		改訂指針の構成案		主な修正事項
第1章	防災アセスメントの目的と対象	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		1.1 防災アセスメントの目的	指針の改訂経緯、位置付けに関して追記。 ・2011年東日本大震災を踏まえて改訂。 ・指針は参考として示すものであり、指針で取り上げないことも重要な事項については評価に加える必要がある。
	1.2 防災アセスメントの対象		1.2 防災アセスメントの対象	対象災害については、地震時の災害を短周期地震動（強震動及び液状化）、長周期地震動、津波による災害に分けて記載。
第2章	防災アセスメントの考え方	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基本概念		2.1 防災アセスメントの考え方	確率的なリスク評価を行う災害事象と、その他の評価方法を適用する災害事象があるため、初めに整理する。 ・定量的評価（確率的手法） ・定量的評価（確定的手法） ・定量的評価が困難なものについては補足にとどめる。
	2.2 防災アセスメント手法の概要		2.2 確率的なリスク評価の考え方	イベントツリーを用いた評価手法の概要をまとめる。
	2.3 評価レベル（評価の細かさ）		2.3 評価レベル（評価の細かさ）	
	2.4 評価にあたっての留意点		2.4 評価にあたっての留意点	
第3章	評価対象施設の選定と区分	第3章	評価対象施設の選定と区分	
	3.1 対象施設の選定		3.1 対象施設の選定	
	3.2 対象施設の区分		3.2 対象施設の区分	
第4章	平常時の防災アセスメント	第4章	災害の発生・拡大シナリオの展開	「災害の発生・拡大シナリオの展開」について新たに章立て。
	4.1 災害の拡大シナリオの想定		4.1 初期事象の設定	
	4.2 災害の発生危険度の推定		4.2 事象分岐の設定	
	4.3 災害の影響度の推定		4.3 イベントツリーの展開	
	4.4 総合的な災害危険性の評価		4.4 各シナリオの評価方針	平常時の事故、短周期地震動による被害、長周期地震動による被害…など、各シナリオ（災害事象）の特性に応じた評価方針。
第5章	地震時の防災アセスメント	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に関する確率的なリスク評価。
	5.1 前提となる地震動の想定		5.1 評価の概要	
	5.2 災害の拡大シナリオの想定		5.2 災害の発生危険度の推定	
	5.3 災害の発生危険度の推定		5.3 災害の影響度の推定	
	5.4 災害の影響度の推定		5.4 総合的な災害危険性（リスク）の評価	
	5.5 総合的な災害危険性の評価			

現指針の目次構成	改訂指針の構成案	主な修正事項
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被害の評価」について新たに章立て。
	6.1 速度応答スペクトルの算定	
	6.2 スロッシング波高の算定	
	6.3 溢流量の推定・流出火災の想定	
	6.4 タンク火災の想定(浮き屋根式)	
	6.5 ドレン排水口からの流出想定	
	6.6 その他の災害想定	
	6.7 長周期地震動による災害の影響	
第7章	大規模災害の評価	「大規模災害の評価」について新たに章立て。
	7.1 影響算定が可能な災害	
	7.2 影響算定が困難な災害	
第8章	津波による災害の評価	「津波による災害の評価」について新たに章立て。
	8.1 危険物タンクの被害	
	8.2 高圧ガスタンクの被害	
第9章	防災アセスメント結果の活用と公表	現状の問題点を踏まえ必要な修正を行う。
	9.1 防災アセスメント結果の活用	
	9.2 想定災害に基づく対策の考え方	
	9.3 防災アセスメント結果の公表	
参考資料	参考資料	
	参考資料1 災害拡大ETの一例	イベントツリーの見直し
	参考資料2 災害現象解析モデルの一例	災害影響の評価手法の見直し
	参考資料3 …	その他の資料追加

石油コンビナートの防災アセスメント指針 改訂素案

目 次

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
- 1.2 防災アセスメントの対象

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
- 2.2 確率的なリスク評価の考え方
- 2.3 評価のレベル（評価の細かさ）
- 2.4 評価にあたっての留意点

第3章 対象施設の選定と区分

- 3.1 対象施設の選定
- 3.2 対象施設の区分

第4章 災害の発生・拡大シナリオの展開

- 4.1 初期事象の設定
- 4.2 事象分岐の設定
- 4.3 イベントツリーの展開
 - 4.3.1 単独災害のシナリオ
 - (1) 平常時の事故
 - (2) 短周期地震動による被害
 - (3) 長周期地震動による被害
 - 4.3.2 大規模災害のシナリオ
 - 4.3.3 津波による災害のシナリオ
- 4.4 各シナリオの評価方針

第5章 確率的なリスク評価

- 5.1 評価の概要
- 5.2 災害の発生危険度の推定
 - 5.2.1 平常時の災害発生危険度
 - 5.2.2 地震時の災害発生危険度
- 5.3 災害の影響度の推定
 - 5.3.1 解析モデルの選定

- 5.3.2 [基準値](#)の設定
- 5.3.3 影響度の推定
- 5.4 総合的な災害危険性（リスク）の評価

第6章 長周期地震動による被害の評価

- 6.1 速度応答スペクトルの算定
- 6.2 スロッシング波高の算定
- 6.3 溢流量の推定・流出火災の想定
- 6.4 タンク火災の想定（浮き屋根式）
- 6.5 ドレン排水口からの流出想定
- 6.6 その他の災害想定
- 6.7 長周期地震動による災害の影響

第7章 大規模災害の評価

- 7.1 影響算定が可能な災害
- 7.2 影響算定が困難な災害

第8章 津波による災害の評価

- 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
 - 8.1.2 地震による流出後の津波
- 8.2 高圧ガスタンクの被害

第9章 アセスメント結果の活用と公表

- 9.1 防災アセスメント結果の活用
- 9.2 想定災害に基づく対策の考え方
- 9.3 防災アセスメント結果の公表

参考資料

- 災害の発生・拡大シナリオの一例
- 災害現象解析モデルの一例

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、石油コンビナートは多種多様な数多くの施設があり、これらで発生しう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)のコンビナート施設で発生する可能性がある漏えい、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
- 5×10^{-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。

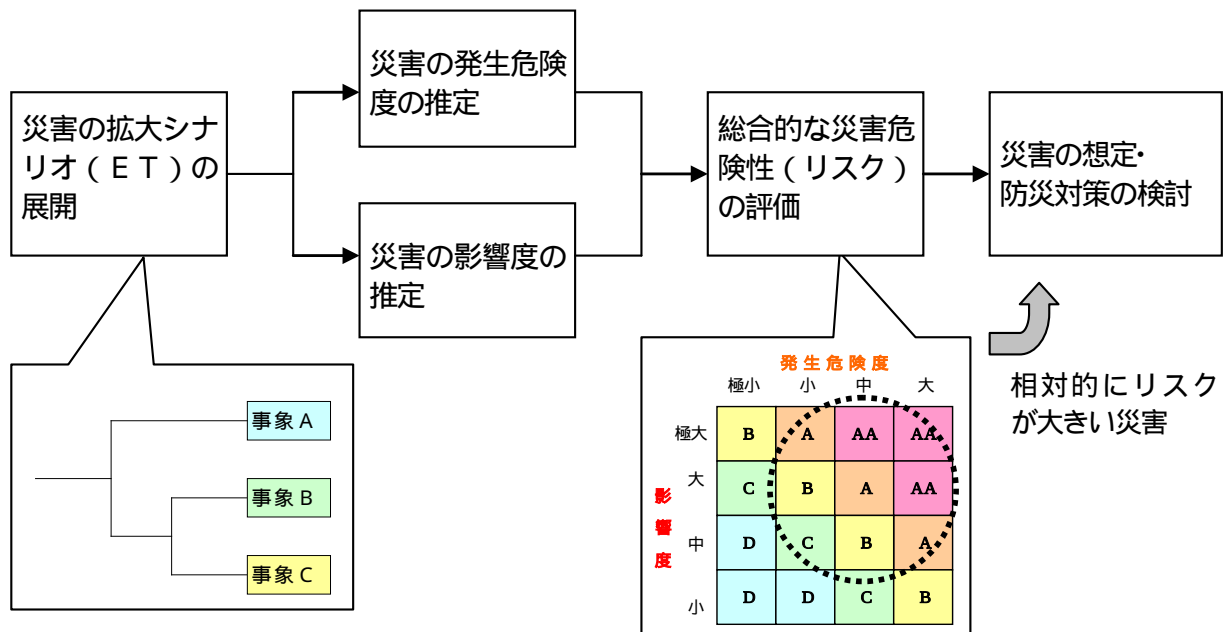


図 2.1 防災アセスメントにおけるリスク評価の基本概念

(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。

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。

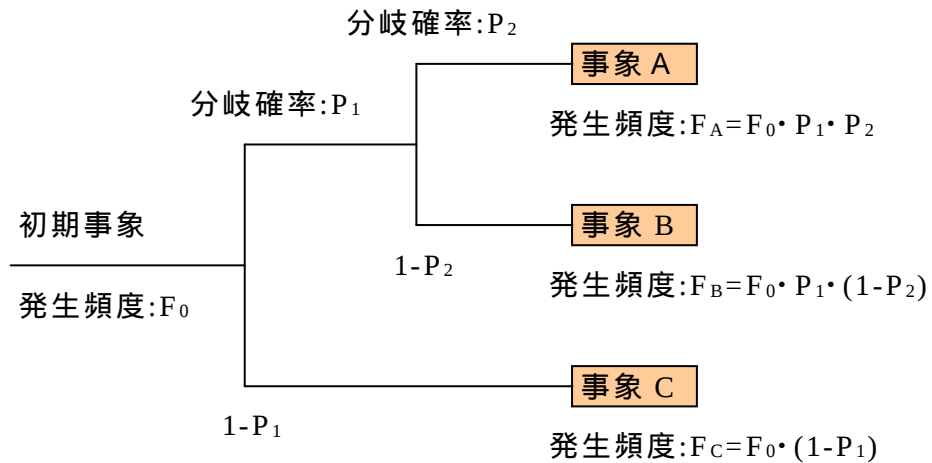


図 2.2 イベントツリーの概念図

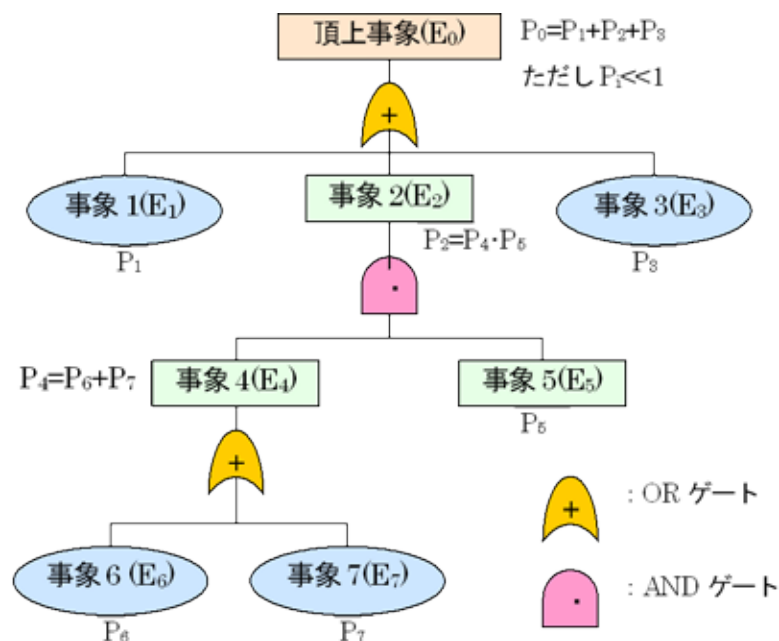


図 2.3 フォールトツリーの概念図

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、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えい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地域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が十分に整備されているとはいいがたい。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 EPA が開発した ALOHA 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。

第3章 対象施設の選定と区分

3.1 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。

ア．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。

イ．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。

ウ．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。

エ．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。

オ．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500～1,000 klの危険物タンク（特に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。

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。

3.2 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でして評価を行う。

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、評価の内容や方法によっては、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。



図 3.1 主なコンビナート施設の区分例

第4章 災害の発生・拡大シナリオの展開

対象とする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。

初期事象の設定

事象分岐の設定

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。これらのシナリオにおいて、どこまで現実的に起こり得るものとして取り上げるか、またどのような評価を行うかについては後述する。なお、ここで示すの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地区の特性や立地条件を反映し、より具体的に展開すべきものもある。また、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、配管の弁（緊急遮断弁あるいは受払弁）よりタンク側の破損はタンク本体に含めるものとしている。

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

* 製造プラントの緊急停止等に伴う異常反応については、プラントのプロセス条件や緊急停止の方法等により災害の発生危険性や拡大様相が異なることから、個別に検討する必要がある。また、津波による設備浸水についても個別の製造プラントにより異なると考えられるため、これらはリスク評価の対象とせず、その危険性については留意事項等により言及する。

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）、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）

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）	○	○	○	○

*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。

*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。

*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。

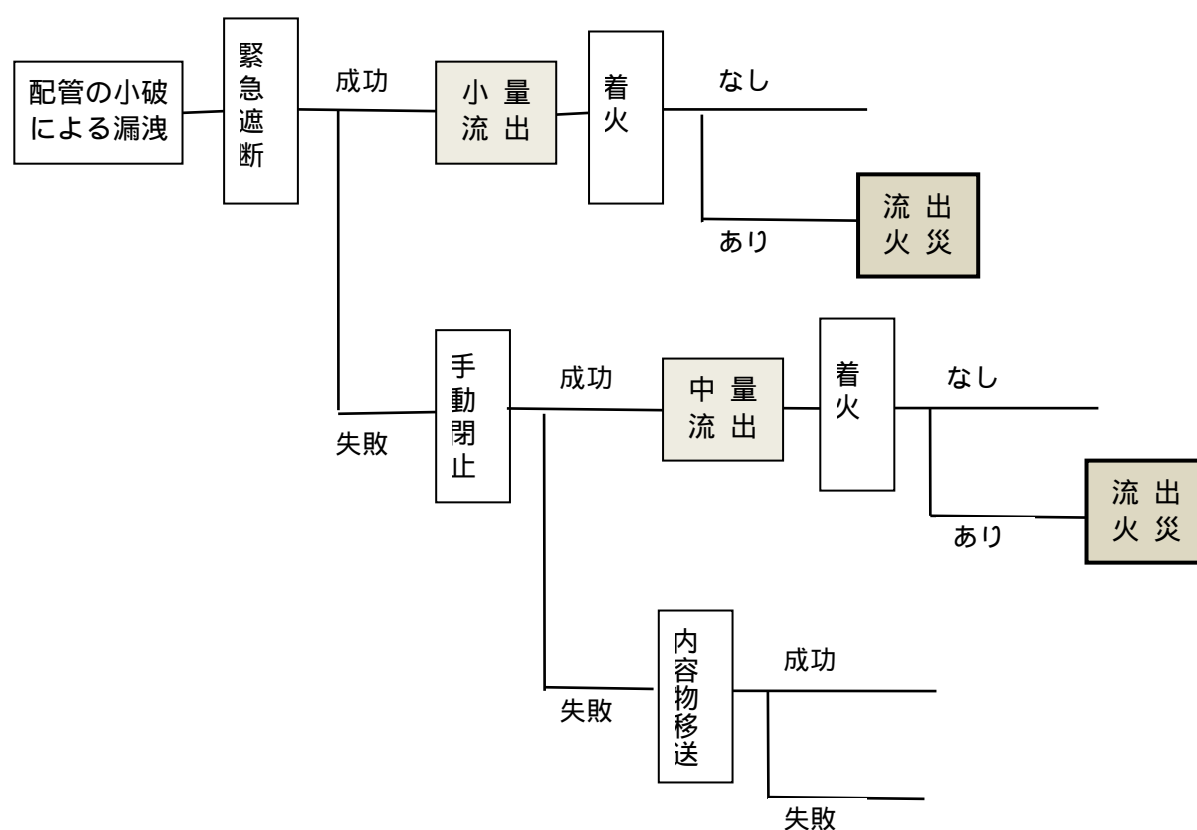


図 4.1 イベントツリー展開の概念図

表 4.1 の各初期事象について、ET の展開例を以下に示す。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_2.1.1 （*ET 番号は第 2 回研究会資料 3-1 に等しい）
- タンク本体の小破による漏洩 → ET_2.1.2
- 配管の大破による漏洩 → ET_2.1.3
- タンク本体の大破による漏洩 → ET_2.1.4
- 浮き屋根シール部での出火（浮き屋根式） → 追加（現指針と同じ）
- タンク屋根での出火（固定屋根式） → 追加（現指針と同じ）

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（球形・円筒横置き型）

- 配管の小破による漏洩 → ET_2.2.1
- タンク本体の小破による漏洩 → ET_2.2.2
- 配管の大破による漏洩 → ET_2.2.3
- タンク本体の大破による漏洩 → ET_2.2.4

上記の E T 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は、基本的には可燃性ガスと同様であるが、事象分岐として水幕設備や除害設備を考慮する必要がある、また災害事象は「火災・爆発」の代わりに「毒性拡散」となる。（→ET 例を作成予定）

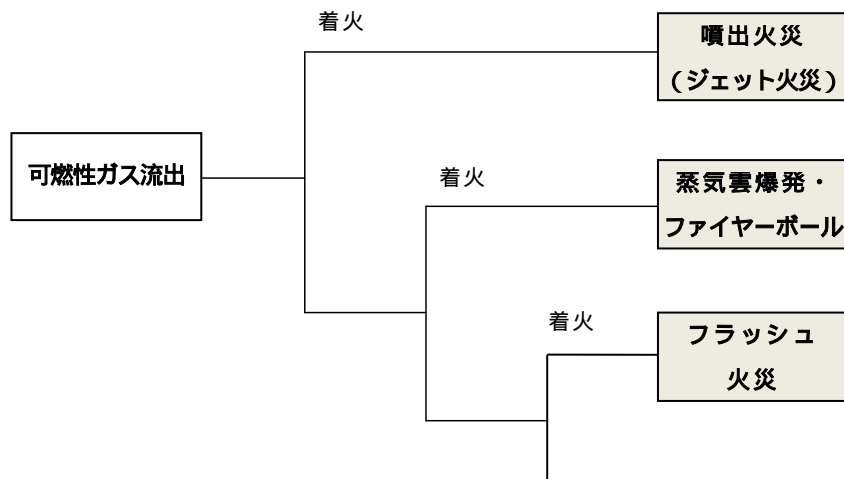


図 4.1 可燃性ガスの燃焼形態

ウ．製造プラント

製造設備には、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。

一般的な製造施設は、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次の事象を初期事象とする。

製造設備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。このような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_2.3.1

○ 装置の大破による漏洩 → ET_2.3.2

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時には図 4.1 のような燃焼形態をとる。また、製造設備には、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、「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_2.1.1](#)
- タンク本体の小破による漏洩 → [ET_2.1.2](#)
- 配管の大破による漏洩 → [ET_2.1.3](#)
- タンク本体の大破による漏洩 → [ET_2.1.4](#)

イ．可燃性ガスタンク（球形・円筒横置き型）

- 配管の小破による漏洩 → [ET_2.2.1](#)
- タンク本体の小破による漏洩 → [ET_2.2.2](#)
- 配管の大破による漏洩 → [ET_2.2.3](#)
- タンク本体の大破による漏洩 → [ET_2.2.4](#)

ウ．製造プラント

- 装置の小破による漏洩 → [ET_2.3.1](#)
- 装置の大破による漏洩 → [ET_2.3.2](#)

(3) 長周期地震動による被害

長周期地震動による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_2.4.1](#)
- 浮き屋根の破損・沈降（浮き屋根式） → [ET_2.4.2](#)
- タンク中のドレン配管の破損 → [ET_2.4.3](#)
- タンク上部の破損 → [ET_2.4.4](#)
- 浮き蓋の損傷・沈降 → [ET_2.4.5](#)

* *LNG タンクや LPG 円筒平底タンクについては、高圧ガス設備の耐震設計基準により、長周期地震動による耐震性能が確保されている。過去の地震では、これらの設備でスロッシングによる漏洩等の被害は発生していないが、想定以上の地震動が作用した場合には、スロッシング被害が発生し得る。しかしながら、被害の発生危険性については、タンク上部の構造や強度等により異なるものと考えられるため、アセスメント実施の際はこれらを考慮の上、個別に検討する必要があると考えられる。*

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_2.1.5](#)
- 防油堤火災からの延焼拡大 → [ET_2.1.6](#)

イ．可燃性ガスタンク

- BLEVE による延焼拡大 → [ET_2.2.5](#)

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、コンビナート地区に関しては、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_2.5.1](#)
- タンクの移動・転倒による漏洩 → [ET_2.5.2](#)
- 地震による流出後の津波 → [ET_2.5.3](#)

イ．可燃性ガスタンク

- 配管の破損による漏洩 → [ET_2.5.4](#)
- タンクの移動・転倒による漏洩 → [ET_2.5.5](#)

4.4 各シナリオの評価方針

ここ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、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「移動」の可能性を判定し、これをもとに流出量の想定を行う。流出後の拡大様相、また高圧ガスタンク等の被害については、その他の施設（主に高圧ガスタンク）については、立地条件等を反映した具体的な流出拡大シナリオを展開し、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。

5.1 評価の概要

確率的なリスク評価の手順は次のとおりである（図 2.1）。

災害の発生危険度の推定

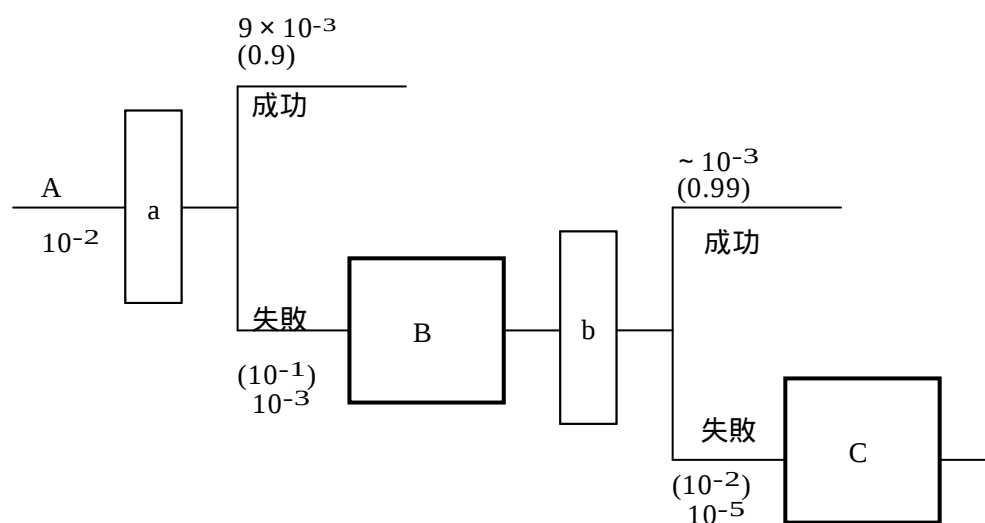
災害の影響度の推定

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。

5.2 災害の発生危険度の推定

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（あるいは確率）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（あるいは確率）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 5.1 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 5.1 ETA による災害発生危険度推定の考え方

5.2.1 平常時の災害発生危険度

- (1) 初期事象の発生頻度
- (2) 事象の分岐確率
- (3) 災害事象の発生頻度

→ 現指針の内容と同じ。

5.2.2 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）として表わすことにより確率的評価を行った。地震時の災害発生危険度に関しては次の2通りの表現方法が考えられる。

想定される地震が発生したときの被害確率として表わす。

想定地震の発生頻度（/年）を考慮して、これを上記の被害確率に乘じることにより、平常時と同様に1年あたりの発生頻度（/年）として表わす。

現在、文部科学省地震調査研究推進本部で確率論的地震動予測地図が作成・公開されており、これをベースとすればの表現は可能であり、これにより平常時と地震時で同じ次元で評価することができる。しかし、別に都道府県が実施する地震被害想定及び地域防災計画では地震を確定的に扱っており、地域防災計画と石油コンビナート地区の防災計画は本来一体をなすべきものである。

このようなことから、本指針においては、地震発生頻度を考慮しないの表現を用いることとし、想定地震は地域防災計画と同一とすることを原則とする。この場合、ETAの初期事象は地震が発生したときの施設の被害確率として与えることになり、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。

→ 要検討

○ 東日本大震災の被害状況（H23 消防庁調査、H24 アンケート調査）に基づいた初期事象の発生確率を参考値として示す。

○ フラジリティについて記載？

(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

→要検討

○ 現指針の内容をもとに東日本大震災の被害状況を踏まえて記述。

○ 機械的な防災設備については H24 アンケート調査に基づいた分岐確率の推定を検討する。

(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ことができる。・・・

5.3 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。

解析モデルの選定

基準値の設定

影響度の推定

* 「しきい値」(その値以下では影響が生じない) という名称は、厳密な意味では当てはまらないことから「基準値」に改める。

5.3.1 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えい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厳密なモデルまで様々なものがある。できれば厳密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ない。

主要なコンビナート施設について、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 5.1 である。具体的なモデルの一例（簡易モデル）を「参考○ 災害現象解析モデルの一例」に示す。ただし、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。

→要検討

○ 表 5.1 の見直し

○ 「参考○ 災害現象解析モデルの一例」の更新

表 5.1 主要なコンビナート施設の災害現象と適用モデルの種類 (→見直し)

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	- 液体流出→液面火災 - タンク火災(液面火災)	- 流出率 - 流出範囲(火災面積) - 放射熱
可燃性 ガス タンク	- 液体流出→液面火災 蒸発→拡散→ガス爆発 ファイバー フラッシュ火災 - 気体流出→噴出火災 拡散→ガス爆発 フラッシュ火災	- 流出率 - 蒸発率 - 拡散濃度 - 爆風圧 - 放射熱
毒 性 ガス タンク	- 液体流出→蒸発→拡散(毒性) - 気体流出→拡散(毒性)	- 流出率 - 蒸発率 - 拡散濃度
プラント	- 液体流出→液面火災 蒸発→拡散→ガス爆発 ファイバー フラッシュ火災 - 蒸発→拡散(毒性) - 気体流出→噴出火災 拡散→ガス爆発 フラッシュ火災 - 拡散(毒性) - 容器破裂→飛散	- 流出率 - 蒸発率 - 流出範囲(火災面積) - 拡散濃度 - 爆風圧 - 放射熱
タンカー 棧 橋	- 液体流出→液面火災 蒸発→拡散→ガス爆発 フラッシュ火災 - 蒸発→拡散(毒性) - タンカー爆発→飛散 火災 流出→火災	- 流出率 - 蒸発率 - 流出範囲(火災面積) - 拡散濃度 - 爆風圧 - 放射熱
パイプ ライン	- 液体流出→液面火災 蒸発→拡散→ガス爆発 フラッシュ火災 - 蒸発→拡散(毒性) - 気体流出→噴出火災 拡散→ガス爆発 フラッシュ火災 - 拡散(毒性)	- 流出率 - 蒸発率 - 流出範囲(火災面積) - 拡散濃度 - 爆風圧 - 放射熱

5.3.2 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) 液面火災の放射熱

→ 基準値自体には問題はないと考えられる。

* 旧単位系で切れの良い $2,000\text{kcal/m}^2\text{h}$ としており、これを国際単位系に変換したため端数が出ていることから、 2.3kW/m^2 に改め、旧単位系との併記は止める（以下同様）

(2) ファイヤーボールの放射熱

→ 見直し（ファイヤーボールの継続時間を考慮）

(3) 爆風圧の影響

→ 見直し（ガラス、建物等の破損による負傷などの2次的被害を考慮）

(4) 可燃性ガス拡散（フラッシュ火災）の影響

爆発下限界濃度の $1/2$

(5) 毒性ガス拡散の影響

→ 見直し（現状の IDLH 以外の基準値もあわせて提示）

5.3.3 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

気象条件設定 → 大気安定度の扱い（拡散モデルとの関係）

流出孔（開口部）の設定 → 流出規模（小破流出、大破流出）に応じた考え方

影響範囲の算定

5.4 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。

→ 要検討

- 災害発生危険度ランク設定の考え方（平常時、地震時）
- 影響度ランク設定の考え方
- 想定災害抽出の考え方
- 発生危険度が小さく、影響度が大きい災害の扱い（後述の低頻度大規模災害との関連）

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、個々の石油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。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

○ 想定地震の予測波形の入手（長周期成分を含む）

○ 速度応答スペクトル（疑似速度応答スペクトル）の算出

* 地震波形（長周期成分を含む）が入手できない場合は？

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。

$$\eta = 0.837 \left(\frac{D}{2g} \right) \left(\frac{2\pi}{T_s} \right) S_v(T_s)$$

$$T_s = 2\pi \sqrt{\left(\frac{D}{3.682g} \right) \coth \left(\frac{3.682H}{D} \right)}$$

η : 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/s²)

T_s : タンクのスロッシング基本固有周期(s)

$S_v(T_s)$: 周期 T_s における速度応答スペクトル(m/s)

また、上式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十分な適用性が確認されている。

$$\eta^+ = \eta + \Delta \eta$$

$$\Delta \eta = 0.91 R \left(\eta / R \right)^2$$

η^+ : 非線形性を考慮したスロッシング最大波高(m)

η : スロッシング最大波高（上記の線形解）(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）

η 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（ δv ）を計算する（西晴樹他 2008）。さらに、 δv の大小、油種に応じて流出火災の想定を行う。（例えば図 6.1 → 要検討）

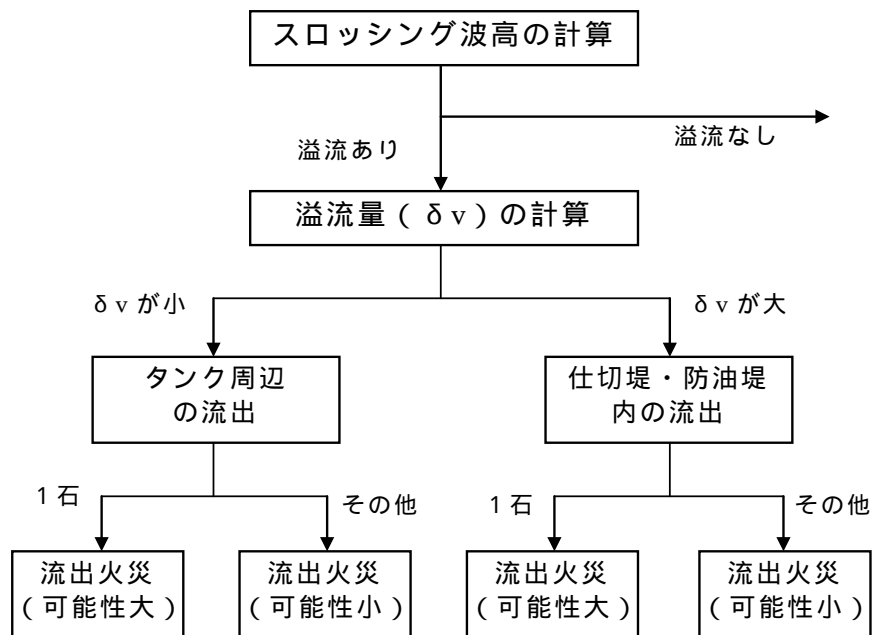


図 6.1 溢流量の推定・流出火災の想定の考え方（→要検討）

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ボ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（ η ）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。さらに、全面火災が想定される原油タンクではボイルオーバーが発生することもある必要がある。

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、浮き根上に流出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ことになる。

6.6 その他の災害想定

→ 要検討

- 内部浮き蓋の損傷・沈降に伴う爆発・火災
- 固定屋根式タンクの上部（側板と屋根板との接合部）の破損による流出・火災

6.7 長周期地震動による災害の影響

→ 上記の想定災害に対する影響評価の考え方（手順）を示す。

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り、地震時に起こり得る災害といえる。このような災害は、5.4 で示し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ることができる。なお、津波を起因とする災害はここには含めず次章で述べる。

7.1 影響算定が可能な災害

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「評価上の低頻度大規模災害」として捉え、影響評価のみを行う。対象とする災害事象としては次のようなものが考えられる。

○ 危険物タンク

- ・ 防油堤内の流出火災（単独災害の確率的なリスク評価で想定される場合もある）
- ・ 防油堤内の隣接タンクを巻き込んだ全面火災

○ 可燃性ガスタンク

- ・ 可燃性ガスの大量流出に伴う爆発
- ・ 隣接タンクの誘爆（BLEVE）を伴う大規模火災

東日本大震災のLPG爆発火災は、BLEVEにより隣接タンクが次々と爆発して大規模火災に至ったものであるが、それぞれのタンクは時間差をおいて爆発しており、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算定しておけばよいと考えられる。

→ **大規模災害に対する影響算定の考え方、手順を示す。**

- (1) 危険物タンクの災害**
- (2) 可燃性ガスタンクの災害**

7.2 影響算定が困難な災害

例えば、危険物タンクにおいて内容物が海上に流出拡大するような事象が考えられる。このような災害の影響範囲は、簡易手法を前提とした防災アセスメントで算定することは困難であり、問題となるタンクの立地条件等を反映した具体的な流出拡大シナリオを展開し、必要な防災対策を確認する。

→ **要検討**

第8章 津波による災害の評価

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

津波により石油タンクの配管や本体が破損する原因としては、津波によるタンクの移動や転倒、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。これらは、いずれも同様の結果（内容物の大量流出・拡大）を引き起こすことから、原因を現段階で評価可能な「津波によるタンクの移動」に代表させることにする。

消防庁は、H21・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、ここで石油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。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、東日本大震災の被害状況をもとに妥当性の検証を行い、被害予測ツールとして有効との結果を得ている（参考○ 屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール）。本指針では、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

まず、国や道府県が実施した津波浸水予測の結果を受けて、コンビナート地区の浸水深を把握する。被害日本大震災での被害状況によると、石油タンクの配管、本体の被害ともに浸水深が3mを超えたところから発生していることが確認されている。したがって、浸水深が3mを超えるところにあるタンクを評価対象として抽出する。

(2) 津波による被害予測（浮き上がり・滑動の判定）

評価対象タンクについて、消防庁の被害予測ツールを用いて「浮き上がり」と「滑動」の判定を行う。その結果は、例えば図8.1のように、浸水深に対して「浮き上がり」と「滑動」の安全率が判定のボーダーラインである1となる貯蔵率がグラフとして表示される。

* 「浮き上がり」、「滑動」いずれかの安全率が1以下であれば「移動あり」として良いか。

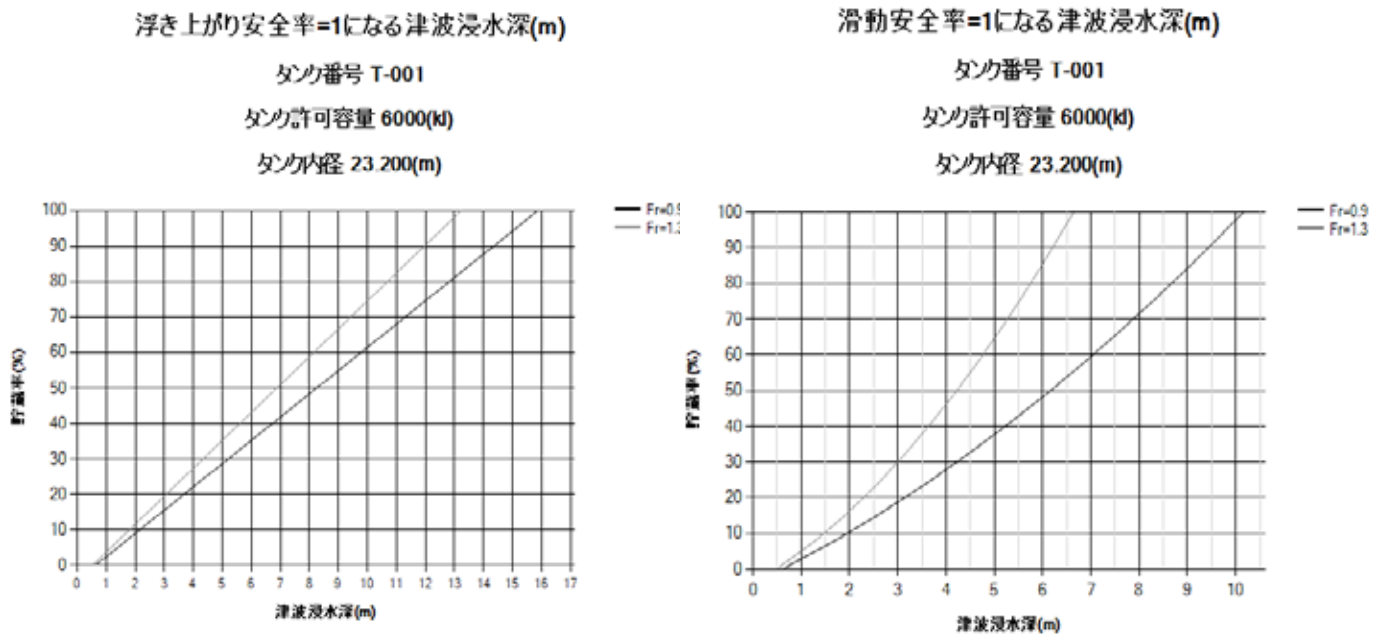


図 8.1 石油タンクの津波被害予測の結果

(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」と判定されたタンクについて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。一般の製油所や輸送所などの事業所では、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 0～100%の間で一様分布すると仮定して流出の期待値を求めることが考えられる。図 8.1 の「浮き上がり」のグラフを見ると、浸水深が 5 m とすると貯蔵率 30% で安全率が 1 となっており、10% 刻みで計算すると、 $600 \times 0.1 + 1200 \times 0.1 + 1800 \times 0.1 = 360\text{KL}$ となる（タンク容量は 6,000KL）。このようにして算出した流出量を、評価対象タンクすべてについて足し合わせたものが被災時の想定流出量となる（備蓄タンクは常時 100%）。

→ 要検討

他の要因、例えばタンクの移動はなくても、漂流物などにより配管や本体が破損するような場合には、貯蔵率は関係なく流出量は上記の推定よりもかなり多くなることが考えられるが、このような場合の流出量を想定することは現状では難しい。

(4) 流出油の拡大

→要検討

- 津波により大量の油の流出が想定される場合には、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り、大規模な火災となることも懸念されるが、このような状況や影響範囲を推定することは困難。
- 津波対策は、重要施設への浸水を如何に防止するか（津波高さにもよるが）事前の緊急遮断などで如何に流出量を少なくするかが基本であり、大量に流出した後の対策はほとんど不可能。したがって、大量流出後の影響を考えてもあまり意味がない。

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。

→要検討

8.2 高压ガスタンクの被害

→要検討

高压ガス施設が波力、浮力及び漂流物により受ける影響評価については経済産業省で検討予定。

第9章 防災アセスメント結果の活用と公表

→ 記述の見直し

- 防災アセスメントによりどのような結果が得られるか。
- その結果を防災計画等にどのように反映していくか。

参考資料

「東日本大震災における防災設備の被害状況等に関する調査」

1 概要

地震時における施設や防災設備の被害状況を調査し、地震動強さに応じた施設被害率や、防災設備の不作動確率を推定する。また、設備の緊急停止の実施状況や緊急停止の考え方について調査し、緊急停止に伴う事故の回避方策について検討する。

2 対象事業所

東北地方太平洋沖地震（2011/03/11 14:46）において、最大震度 5 強以上を観測した特別防災区域に所在する特定事業所のうち、第 1 種事業所を対象とする。ただし、最大震度 6 強以上を観測している宮城県、福島県については、第 2 種事業所も対象とする。

表 1 調査対象事業所数

都道府県	特別防災区域	最大震度 ¹⁾	対象事業所数	計
宮城県	仙台	6強	7	115
	塩釜	6強	7	
福島県	広野	6強	1	
	いわき	6弱	17	
茨城県	鹿島臨海	6弱	14	
千葉県	京葉臨海中部	5強	30	
神奈川県	京浜臨海	5強	36	
	根岸臨海	5強	3	

1) 気象庁観測データ及び推計震度分布による。

3 調査概要

(1) 東日本大震災における施設の被害状況

地震動（液状化を含む）による施設の被害確率を推定するため、地震による被害状況（事業所毎の施設数と被害数）を調査する。

対象とする施設は、危険物の屋外タンク貯蔵所、高圧ガス施設（貯槽、製造施設）、毒劇物タンク。

(2) 東日本大震災における防災設備等の被害状況

地震動（液状化を含む）による防災設備等の不作動確率を推定するため、地震による被害状況（事業所毎の設備数と被害数）を調査する。

対象とする防災設備等は、防災設備駆動用の電源と、危険物の屋外タンク貯蔵所または高圧ガス貯槽に設置された次の設備。

緊急遮断弁、移送ポンプ、散水設備・水幕設備、固定泡消火設備、除害設備
また、あわせて、護岸の側方流動による被害状況を調査する。

(3) 設備の緊急停止に関する事項

東日本大震災や過去の緊急停止事例を調査すると共に、平常時・地震時における設備の緊急停止の考え方について調査する。

4 調査実施期間

10月22日～11月19日

5 回収状況（11月19日時点）

82件／115事業所（回収率：71%）

「東日本大震災における防災設備の被害状況等に関する調査」 調査票

事業所名		
記入担当者	ご所属	
	氏 名	
ご連絡先	T E L	
	E-Mail	

※ご回答は、回答様式（Excel ファイル）にご記入の上ご返信下さい。回答様式はメールにてお送り致しますので、下記メールアドレス宛てにご連絡下さい。なお、本調査票にご記入の上、FAX でお送りいただいても構いません。

※ご回答内容について、後日お問合せさせていただく場合がございますが、その節はどうぞよろしくお願い申し上げます。

※調査に関するお問合せ等は、下記にご連絡下さいますようお願い致します。

【調査に関する問合せ先】

財団法人 消防科学総合センター
 調査研究第1課 平野 亜希子
 TEL 0422-24-7805(直通)
 0422-49-1113(代)
 FAX 0422-46-9940
 E-mail complex@isad.or.jp

1 事業所業態

事業所の業態について、次の中から該当するものを選択して下さい。（複数可）

1.石油精製 2.石油化学 3.化学工業 4.鉄鋼 5.電気 6.ガス 7.その他（ ）

2 東日本大震災における施設の被害状況

（短周期地震動（強震動・液状化）による被害）

（調査対象）

以下の調査対象施設について、該当施設がある場合には被害状況をご記入下さい（建設中の施設を除く）。

（1）屋外タンク貯蔵所

消防法に基づく危険物の屋外タンク貯蔵所

（2）高圧ガス施設

コンビナート等保安規則に基づく以下の施設

① 高圧ガス貯槽

② 高圧ガス製造施設（高圧混在施設（高圧ガス製造施設と危険物製造所の両方に該当）を除く）

(3) 毒劇物タンク

毒物及び劇物取締法で定められた毒物及び劇物で、危険物及び高圧ガスに該当しない毒劇物を貯蔵するタンク（移動可能な容器等で貯蔵されるものを除く）。

（回答方法）

調査対象施設ごとに、事業所内総施設数と、地震動（強震動）または液状化により破損または漏洩被害の生じた施設数をご記入下さい。

※津波や火災の影響による被害は除きます。

※屋外タンク貯蔵所については、スロッシングによる浮き屋根や内部浮き蓋の被害、また浮き屋根上への漏洩は除きます。

事業所内総施設数：被害の有無に関わらず調査対象施設の総数をご記入下さい。屋外タンク貯蔵所はタンク技術基準別に、高圧ガス貯槽は貯蔵物質別にご記入下さい。

破損施設数：地震動（強震動）または液状化により破損が生じたが漏洩には至らなかった施設数をご記入ください。屋外タンク貯蔵所及び高圧ガス貯槽は発生箇所別にご記入下さい。

漏洩施設数：地震動（強震動）または液状化により漏洩が生じた施設数をご記入ください。屋外タンク貯蔵所及び高圧ガス貯槽は発生箇所別にご記入下さい。

（回答）

(1) 屋外タンク貯蔵所

タンクの技術基準		新法 タンク	旧法タンク		準特定タンク		特定外 タンク
			新基準	旧基準	新基準	旧基準	
事業所内総施設数							
破損 施設数	タンク 本体						
	配管等						
漏洩 施設数	タンク 本体						
	配管等						

タンク技術基準

新法：昭和 52 年の技術基準(現行基準)に適合する特定タンク

旧法・新基準：平成 6 年の新基準に適合する旧法タンク(第 1 段階基準を含む)

旧法・旧基準：平成 6 年の旧法新基準に適合しないか適合調査中の旧法タンク

準特定・新基準：平成 11 年の新基準に適合する準特定タンク

準特定・旧基準：平成 11 年の新基準に適合しない準特定タンク
 特定外：容量 500kl 未満の屋外タンク貯蔵所

記入上の注意事項（以下同様）

- （注 1）配管等には弁などの付属機器も含むものとします。
 （注 2）1 施設で破損箇所と漏洩箇所があった場合は、漏洩にカウントして下さい。
 （注 3）1 施設で本体、配管両方に被害が生じた場合は、両方にカウントして下さい。
 （注 4）強震動または液状化による被害がない場合（または不明の場合）は、破損/漏洩施設数は空欄として下さい。

(2) 高圧ガス施設

① 高圧ガス貯槽

貯蔵物質		LNG以外の 可燃性ガス	LNG	アンモニア	塩素	その他 毒性
事業所内総施設数						
破損 施設数	タンク 本体					
	配管等					
漏洩 施設数	タンク 本体					
	配管等					

② 高圧ガス製造施設（高圧混在施設を除く）

事業所内総施設数	
破損施設数	
漏洩施設数	

(3) 毒劇物タンク

事業所内総施設数	
破損施設数	
漏洩施設数	

3 東日本大震災における防災設備等の被害状況

3.1 設備駆動源（電力）の被害状況

使用電力の種類、地震時の電力供給状況について、該当するものを選択して下さい。

(1) 使用電力の種類

1. 電力会社からの送電（買電）及び自家発電
2. 電力会社からの送電（買電）のみ

(2) 東日本大震災時の電力供給状況

①電力会社からの送電

1. 停止（停電）した
2. 停止（停電）しなかった

②自家発電設備（上記(1)で1とした場合）

1. 停止した
2. 停止しなかった

3.2 防災設備の被害状況（駆動源の喪失による被害を除く）

（調査対象）

以下の調査対象施設について該当施設（建設中の施設を除く）がある場合には、当該施設に設置されている防災設備の被害状況をご記入下さい。

(1) 屋外タンク貯蔵所

消防法に基づく危険物の屋外タンク貯蔵所

(2) 高圧ガス貯槽

コンビナート等保安規則に基づく貯槽

（回答方法）

地震後に点検を行った防災設備の数と、その中で地震動により損傷を受けて作動不能であったと考えられる防災設備の数をご記入下さい。

※津波や火災の影響による被害は除きます（点検した設備の数、作動不能であった設備の数のいずれにもカウントしない）。

※屋外タンク貯蔵所については、スロッシングによる付属設備の損傷を除きます（点検した設備の数、作動不能であった設備の数のいずれにもカウントしない）。

※常用電源の喪失、非常電源のトラブルにより作動不能となったものは除きます（点検した設備の数にはカウントするが、作動不能であった設備にカウントしない）。

(回答)

(1) 緊急遮断弁・タンク元弁（屋外タンク貯蔵所、高圧ガス貯槽に取り付けられたもの）

石油タンク	遠隔操作弁			手動弁
	電動弁	空気弁	電動・空気	
点検した弁の数				
作動不能であった弁の数				

高圧ガス貯槽	遠隔操作弁			手動弁
	電動弁	空気弁	電動・空気	
点検した弁の数				
作動不能であった弁の数				

- *1) 電動弁・作動不能：操作ボタン、リレー回路、弁本体など関連機器の損傷により、地震当時正常に作動できなかったと考えられる弁の数。
- *2) 空気弁・作動不能：関連機器の損傷やエア喪失により、地震当時正常に作動できなかったと考えられる弁の数。
- *3) 電動・空気弁（二重化）・作動不能：上記 *1)、*2)の原因により、地震当時手動により閉止できなかったと考えられる弁の数。
- *4) 手動弁・作動不能：地震による変形などで、地震当時手動により閉止できなかったと考えられる弁の数。

(2) 電動ポンプ（石油タンクや高圧ガス貯槽が被災したとき、内容物の緊急移送に用いるもの）

点検したポンプの数	
作動不能であったポンプの数	

(3) 散水設備・水幕設備

点検した設備の数	
作動不能であった設備の数	

(4) 消火設備（石油タンクの固定泡消火設備）

点検した設備の数	
作動不能であった設備の数	

(5) 除害設備（吸収塔方式）

点検した設備の数	
作動不能であった設備の数	

(6) 非常用発電設備（ディーゼル発電機）

点検した設備の数	
作動不能であった設備の数	

3.3 護岸の側方流動による被害状況（沿岸部に立地する事業所のみ）

護岸の側方流動やそれに伴う被害の発生状況について、該当するものを選択して下さい。

(1) 液状化により、護岸部で側方流動が発生しましたか。

1. 発生した
2. 発生しなかった
3. 不明

※側方流動とは、液状化した地盤が水平方向に変位する現象です。

※津波による護岸被害は除きます。

→ 発生した場合（上記 1）

(2) 護岸の側方流動により、沿岸部に立地するタンク等の施設に被害（損傷、沈下、傾斜等）はありましたか。

1. あった
2. なかった
3. 不明

→ あった場合（上記 1）

(3) 施設の被害状況を具体的にご記入下さい。

--

4 設備の緊急停止に関する事項

(調査対象)

以下の調査対象施設について、該当施設（建設中の施設を除く）がある場合には、以下の設
問にご回答下さい。

(1) 危険物の製造所

消防法に基づく危険物の製造所

(2) 高圧ガス製造施設

コンビナート等保安規則に基づく高圧ガスの製造設備

4.1 東日本大震災における設備の緊急停止

地震発生当時の設備（上記の調査対象施設）の緊急停止状況等について、該当するものを選択して下さい。

(1) 緊急停止の状況

1. すべての設備を緊急停止した
2. 一部の設備あるいは機器を緊急停止した
3. 緊急停止しなかった

→ 緊急停止した場合（上記 1、2）

(2) 緊急停止の方法（設備によって異なる場合は該当するものすべてを選択して下さい）

1. 地震を検知して自動停止した
2. 地震による機器・プロセスの異常を検知して自動停止した
3. 地震発生時に運転員（責任者）の判断で緊急停止した
4. 津波警報の発令後に運転員（責任者）の判断で緊急停止した
5. 緊急地震速報を受けて緊急停止した
6. その他（

(3) 緊急停止に伴うトラブルの有無

1. すべての設備が正常に停止した
2. プロセス、装置などに異常をきたした設備があった

→ 異常があった場合（上記2）

異常の内容をご記入下さい。

4.3 設備の緊急停止の考え方

貴事業所における設備の緊急停止の考え方についてお聞きします。

(1) 地震時における設備の緊急停止基準

1. 定めている
2. 定めていない

→ 定めている場合（上記 1）

停止基準（gal）と地震計連動の有無をご回答下さい。

設備種類	停止基準(gal)	地震計連動(○)
用役設備(すべて)		
用役設備(一部)		
製造設備		
出荷設備		
その他()		

用役設備（一部）：電力など防災上必要な設備を除いたもの

地震計連動：地震計と連動して(人の判断を要せずに)停止する場合に○をつけて下さい。

(2) 津波警報発令時における設備の緊急停止基準

1. 定めている
2. 定めていない

→ 定めている場合（上記 1）

停止するものに(○)をつけて下さい。

設備種類	大津波警報	津波警報	津波注意報
用役設備(すべて)			
用役設備(一部)			
製造設備			
出荷設備			
その他()			

(3) 設備の緊急停止に関する課題

設備の緊急停止に関して、検討している（あるいは検討したいと考えている）対策や課題について、次のうち該当するものを選択して下さい。（複数可）

1. 地震時の停止基準の見直し
2. 津波警報発令時の停止基準の見直し

やま せ とし ろう
山 瀬 敏 郎†

キーワード：石油コンビナート、災害想定、リスク評価、イベントツリー

109/117

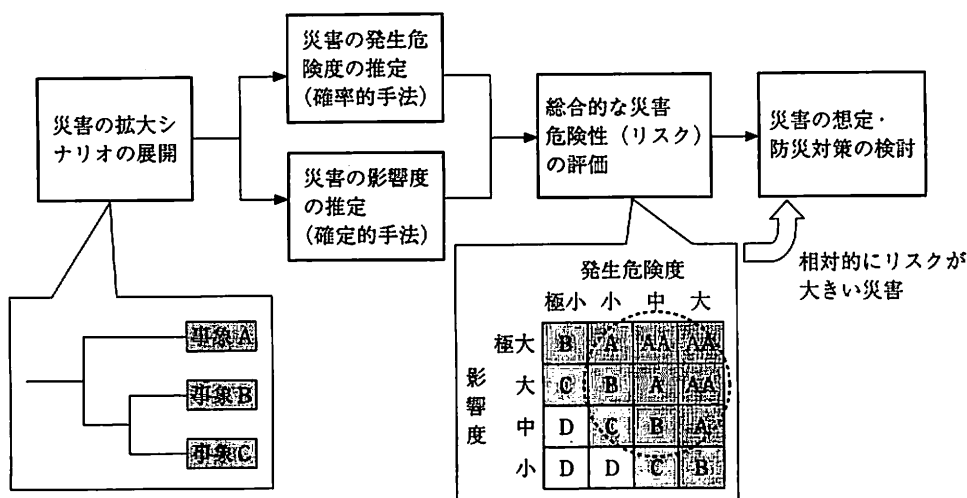


図1 消防庁指針による防災アセスメントの考え方

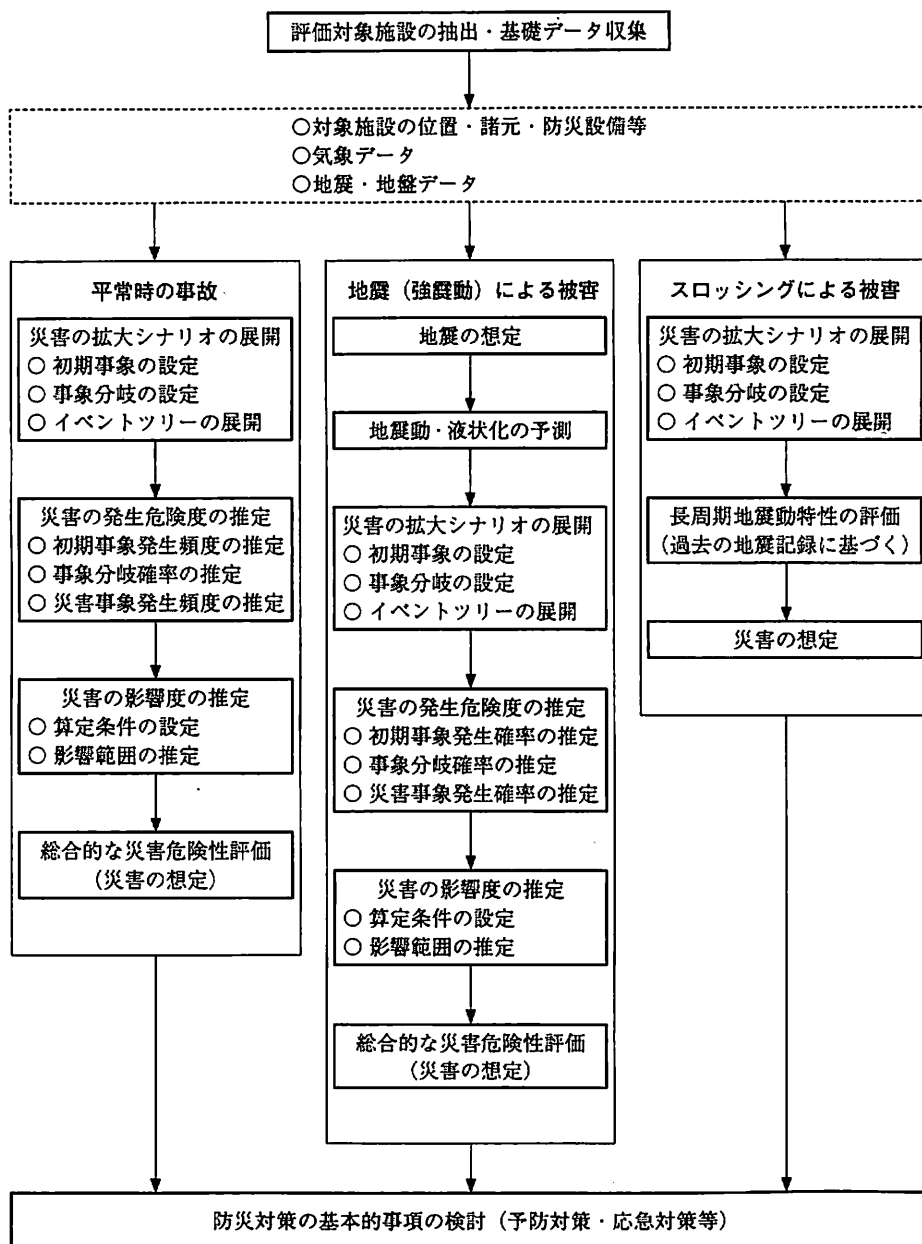


図2 防災アセスメント調査の実施フロー

表1 防災アセスメントの対象施設

施設種類			釧路地区	苫小牧地区		室蘭地区	上磯地区	知内地区
				西 港	東 部			
危険物 タンク	第 4 類	固定屋根	28	132	1	82	34	1
		内部浮屋根	10	45	3	21	3	
		浮屋根		21	93	12	6	3
		計	38	198	97	115	43	4
		硫 黄		3		4		
高圧ガス タンク		可燃性		16		11	3	
		毒 性		13				3
プラント		製 造		29		24		
		発 電		2		1		2

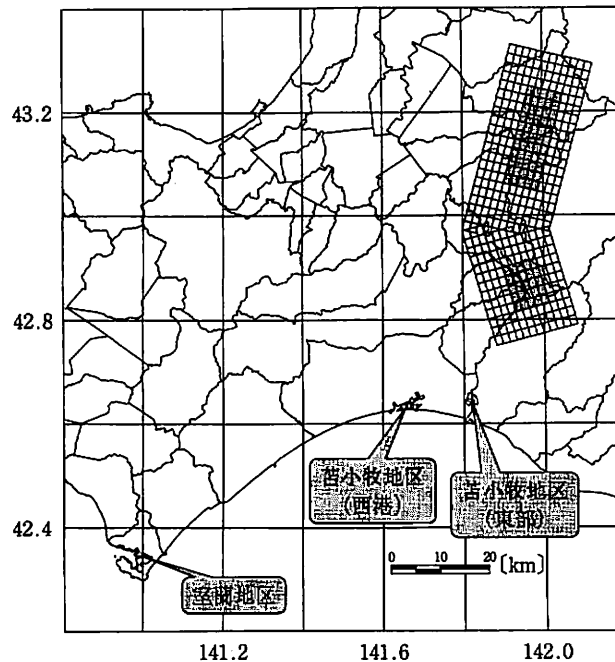


図3 苫小牧・室蘭地区の想定震源（石狩低地東縁断層帯）

3.2 地震動の予測

まず、上記震源断層で地震が発生したときの各コンビナート地区の地震動予測を行った。このとき、震源から各地区直下の工学的基盤までは統計的グリーン関数法、工学的基盤から地表面までは等価線形法による地震応答解析を用い、地表面での地震波形を求めた。さらに、この地震波形をもとに、後述の被害モデルに入力するための実効加速度とPL値（液状化指数）を算出した。実効加速度は、地表での加速度応答スペクトルの0.1～0.5秒の平均値を2.5で割った値であり、危険物タンクの損傷に実効的に作用する周期帯の地震動強さを表す指標と考えられる⁴⁾。苫小牧地区（西港）における地震動の予測結果を図4に示す。

3.3 災害拡大シナリオの展開

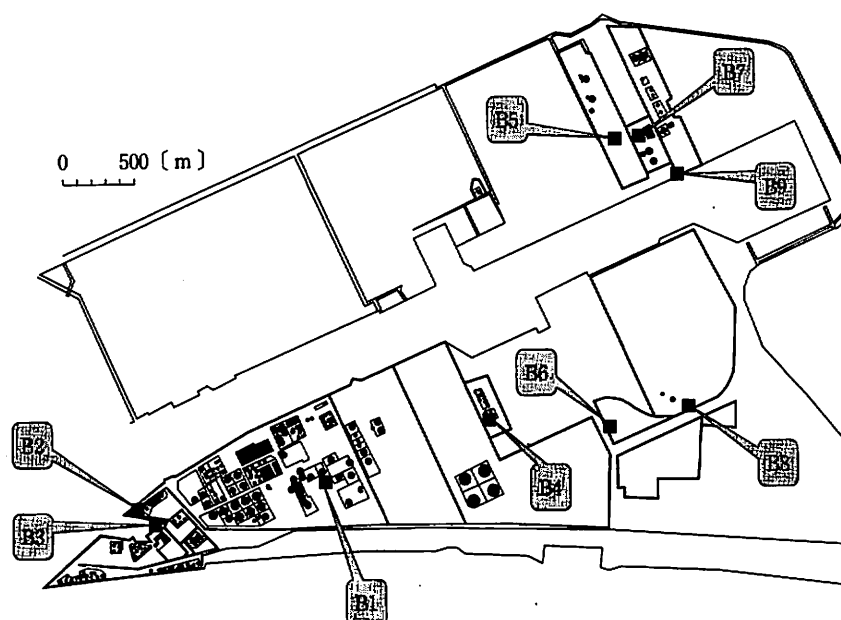
危険物タンク、可燃性・毒性ガスタンク、プラント

のそれぞれについて、地震動や液状化に起因する漏洩等の被害事象（初期事象）、災害の拡大防止に寄与する防災設備等に関わる事象分岐を設定してイベントツリー（ET）を展開し、可能性として起こり得る災害事象を抽出する。例えば、危険物タンクについては、表2の左欄と中央欄のような初期事象と事象分岐を設定し、右欄のような災害事象を抽出した。なお、地震時と平常時では、初期事象の発生原因は異なるが、事象の種類や発生後の拡大様相は同様と考えられ、したがってイベントツリーも同様のものを用いることができる。

3.4 災害発生危険度の推定

3.4.1 初期事象の発生確率

平常時は、災害発生危険度を1年あたりの発生頻度として表すが、地震時は地震が起こったときの発生確



計算地点	計測震度	最大速度 [kine]		最大加速度 [gal]		実効加速度 [gal]		PL 値
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	
B1	5.8	57	44	376	307	230	178	4.3
B2	6.0	61	56	434	400	285	236	0.5
B3	5.8	56	46	350	329	218	196	0.0
B4	5.8	59	44	345	286	224	189	0.0
B5	5.8	50	48	265	343	191	186	0.0
B6	6.3	67	74	393	590	236	289	9.8
B7	5.8	53	49	282	378	224	216	0.0
B8	5.9	71	56	349	491	224	287	6.5
B9	5.9	62	55	327	393	185	254	0.5

図4 苫小牧地区（西港）における地震動の予測結果

表2 危険物タンクの初期事象・事象分岐および出現し得る災害事象

初期事象	事象分岐	災害事象
○ 配管の破損による漏洩	○ 緊急遮断の失敗	○ 小量流出火災
○ タンク本体の小破漏洩	○ バルブ手動閉止の失敗	○ 中量流出火災
○ タンク本体の大破漏洩	○ 一時的な漏洩・拡大防止の失敗	○ 仕切堤内の流出火災
	○ 内容物移送の失敗	○ 防油堤内の流出火災
	○ 仕切堤による拡大防止の失敗	○ 防油堤外の流出火災
	○ 防油堤による拡大防止の失敗	
	○ 流出油の着火	

率としてとらえる（地震の発生頻度は考慮しない）。

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、対象施設の構造や強度によって大きく異なり、これらの要因をできるだけ反映して推定することが望ましい。兵庫県南部地震の直後、消防庁が激震地区に近い事業所を対象に行った石油タンクの被害状況調査では、236基のタンクのうち本体からの漏洩1基、配管接続部からの漏洩7基で、発生確率はそれぞれ 4.2×10^{-3} 、 3.0×10^{-2} となる⁵⁾。しかし、この

ような数少ない被害事例から、地震動の強さやタンクの強度による被害率の違いを推定することは難しい。

そこで、消防研究所が神戸市内236基の石油タンクを対象に行った座屈強度の解析結果⁶⁾に基づいた図5の被害モデルを適用した。ここで、入力加速度（X）は、施設直近の計算地点における実効加速度を用いている。なお、ガスタンクやプラントについては、このような解析結果が得られないため、専門的判断に基づいて新法あるいは旧法の石油タンクと同程度といった

$R = Cr \cdot Cl \cdot \Phi((\ln X - \lambda i) / \zeta i)$
 R : 漏洩発生率
 X : 地表加速度 [gal]
 Φ : タンクの座屈に関する被害関数
 (標準正規分布の累積確率分布関数)
 $\lambda i, \zeta i$: $\ln X$ の平均と標準偏差
 ($i=1$: 新法, $i=2$: 旧法, $i=3$: 準特定)
 Cr : 座屈から破損 (漏洩) に至る比率
 (配管破損 : 0.4, 本体小破 : 0.2, 本体大破 : 0.02)
 Cl : 液状化係数
 ○ $PL=0$: 1.0
 ○ $0 < PL \leq 5$: 1.2
 ○ $5 < PL \leq 15$: 1.5
 ○ $PL > 15$: 3.0

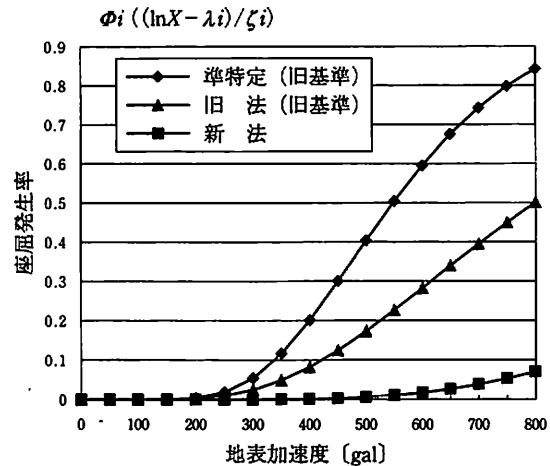


図5 危険物タンクの地震被害モデル

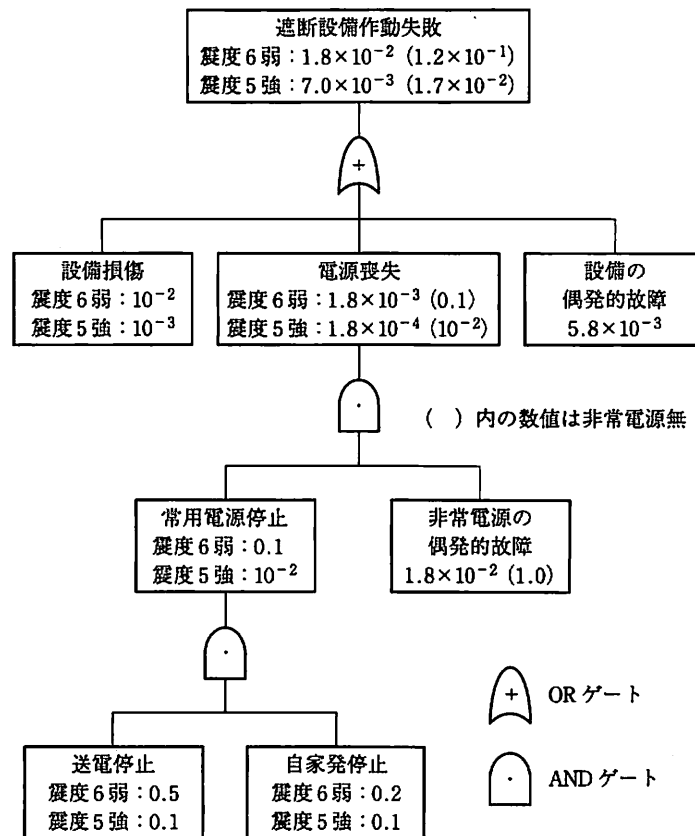


図6 遮断設備 (電動) の作動失敗に関する FT 図

ように仮定した。

3.4.2 事象の分岐確率

地震時において遮断設備、移送設備、消火設備などの防災設備が作動しなくなる原因としては、主に電力等の駆動源の停止、地震による設備の損傷、設備の偶発的な故障が考えられる。これを図6のようなFT図として表し、地震動に応じて末端事象の確率を与えることにより失敗確率を推定する。末端事象の中の設備や非常電源の偶発的故障の確率は海外の故障率デー

タ^{7),8)}に基づいているが、その他については専門的判断をもとに仮定した。

3.4.3 災害事象の発生確率

評価対象としたすべての施設について、設置場所での地震動と施設特性 (構造基準、貯蔵・取扱物質、防災設備の有無等) をもとに初期事象の発生確率と事象の分岐確率を算出し、これらをETに与えて起こり得る災害事象の発生確率を推定した。さらに、この発生確率をつぎの5段階にレベル分けすることによって発

表3 苫小牧地区（西港）における危険物タンクの災害発生危険度分布

レベル	流出火災				
	小量流出	中量流出	仕切堤内流出	防油堤内流出	防油堤外流出
A	1				
B	15	12			
C	80	43	1	8	
D	102	84	23	34	3
E		59	60	156	195
対象外			114*		
計	198	198	198	198	198

* 仕切堤が設置されていないタンク

生危険度とした。

- レベル A : 10^{-2} 以上
- レベル B : 10^{-3} 程度
- レベル C : 10^{-4} 程度
- レベル D : 10^{-5} 程度
- レベル E : 10^{-6} 以下

苫小牧地区（西港）の危険物タンク（198 基）について、発生危険度の推定結果を災害事象ごとの危険度分布として示すと表 3 のようになる。

3.5 災害影響度の推定

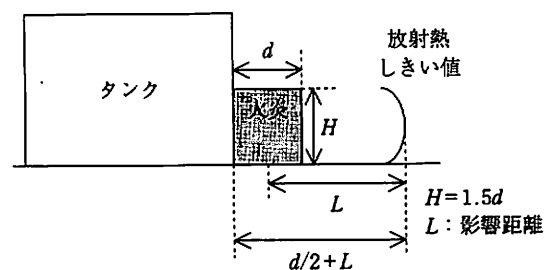
ET に現れる各災害事象について、災害の形態に応じて石油やガスの流出量あるいは火災の規模を想定し、消防庁指針に示された手法を用いて周囲の放射熱、爆風圧、ガス拡散濃度を計算する。そして、人体に対する許容値（しきい値）をもとに影響範囲を求め、つぎの 5 段階にレベル分けすることによって影響度とした。

- レベル I : 200 m 以上
- レベル II : 100 ~ 200 m
- レベル III : 50 ~ 100 m
- レベル IV : 20 ~ 50 m
- レベル V : 20 m 未満

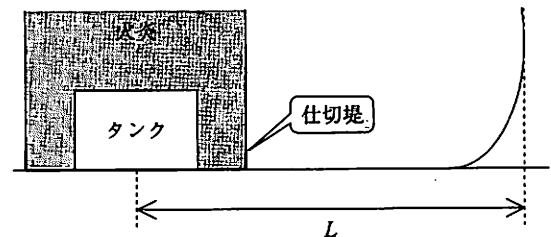
石油タンクで起こり得る各災害事象の影響算定の概念図を図 7 に示す。ここで、しきい値は、消防庁指針に基づいて以下のように設定した。

- 放射熱 : $2383 \text{ J/m}^2\text{s}$ ($2000 \text{ kcal/m}^2\text{h}$)
- 爆風圧 : 11760 Pa (0.12 kgf/m^2)
- 可燃性ガス拡散 : 爆発下限濃度の 1/2
- 毒性ガス拡散 : IDLH

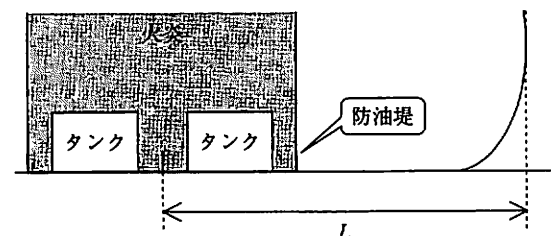
なお、IDLH (Immediate Dangerous to Life and Health) は、米国の NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) が提唱する限界値で、30 分以内に救出されないと元の健康状態に回復しない濃度とされている。



(a) 小量・中量流出



(b) 仕切堤内流出



(c) 防油堤内流出

図7 危険物タンクの影響算定の概念図

3.6 総合的な災害危険性（リスク）の評価

災害事象の発生危険度と影響度をもとに、コンビナート地区の災害危険性をリスクマトリクスとして表し、防災計画で想定すべき災害や対策の優先度などについて検討を行った。苫小牧地区（西港）の危険物タンクの流出火災に関するリスクマトリクスを図 8 に示す。マトリクスの中の数値は該当する施設数を表し

	E	D	C	B	A	計
I						
II						
III						
IV						
V		102	80	15	1	198
計		102	80	15	1	198

(a) 小量流出・火災

	E	D	C	B	A	計
I						
II						
III						
IV	58	78	27	1		167
V	1	6	16	8		31
計	59	84	43	12		198

(b) 中量流出・火災

	E	D	C	B	A	計
I	1					1
II	13	11	1			25
III	30	12				42
IV	16					16
V						
計	60	23	1			84

(c) 仕切堤内流出・火災

	E	D	C	B	A	計
I	8	6	1			15
II	75	18	4			97
III	66	6	1			73
IV	7	4	2			13
V						
計	156	34	8			198

(d) 防油堤内流出・火災

図8 危険物タンクのリスクマトリクス

ている。当地区で想定される地震動はおおむね震度6弱程度（一部6強）であり、大規模火災が高い確率で発生する危険性はかなり小さいといえる。

今回のアセスメント調査では、上記の評価結果をもとに、災害の発生危険度に主眼を置いて防災計画上の想定災害をつぎの2段階でとらえた。

○第1段階の想定災害：おおむね 10^{-3} 以上で発生すると考えられる災害（レベルA、B）

→現実的に起こり得ると考えて対策を検討しておくべき災害

○第2段階の想定災害：おおむね 10^{-4} 程度上で発生すると考えられる災害（レベルC）

→発生する可能性は相当に小さいが万一に備えて対策を検討しておくべき災害（特に影響が大きいもの）

これらの災害が発生したときの影響範囲を地図上に示したものが図9である。第2段階では、一部のタンクで大規模な流出火災が想定されるため、影響範囲が大きくなることわかる。

なお、ここで示した災害の発生危険度や影響度は、推定のプロセスにおいて不確定要素が大きく、絶対的な指標ではなく相対的な指標としてとらえるべきである。特に図示した災害の影響範囲については、大きな円は小さな円よりも相対的に大きな影響を及ぼす可能性があることを示すものであり、絶対的な大きさにあまりこだわらるべきではない。

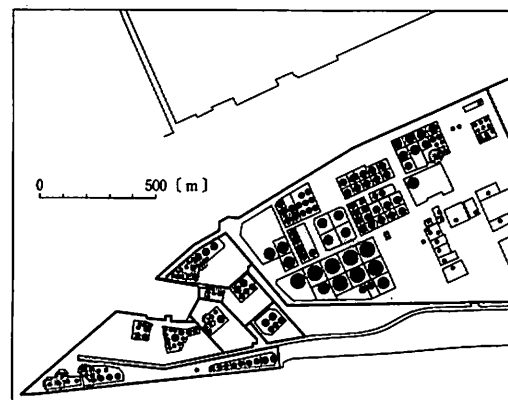
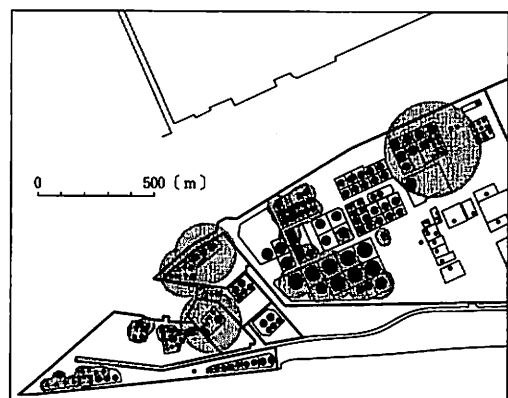
(a) 第1段階の想定災害 (10^{-3} 以上)(b) 第2段階の想定災害 (10^{-4} 以上)

図9 危険物タンクの想定災害の影響範囲

4. スロッシングの評価

スロッシングに関しては、確率的なリスク評価がなされないことから、過去に北海道の周辺海域で発生した地震について、各コンビナート地区に最寄りの地震観測点で観測された地震波形から速度応答スペクトルを求め、これと危険物タンクのスロッシング固有周期を比較することにより評価を行った。ここで使用した地震波形は、(独)港湾空港技術研究所および(独)防災科学技術研究所によるものである。

スペクトル図は省略するが、スロッシングによる被害の危険性が高い地区として、2003年十勝沖地震で大きな被害が発生した苫小牧地区のほか上磯地区が挙げられた。上磯地区では、1993年の北海道南西沖地震で観測された速度応答スペクトルがおおむね6秒以内で100 cm/sを上回っており、1983年の日本海中部地震でも周期5秒以下ではあるが100 cm/sに近い値を示している。これらの地区において、速度応答スペクトルが100 cm/sを超えるあたりの固有周期を持つ危険物タンクについては、浮屋根の損傷や溢流の可能性が大きいといえる。特に、引火点が低い第1石油類のタンクでは、流出火災やタンク火災(リング火災あるいは全面火災)に至る危険性があり注意が必要である。

5. 防災対策の要点

上記の評価結果に基づいて、各コンビナート地区における防災対策の要点を以下にまとめる。なお、これらの記述には、地震時だけでなく平常時の事故を対象とした評価に関わる事項も含まれる。

5.1 釧路地区

釧路地区にあるのは油槽所だけであり、危険物タンクでの漏洩や火災の発生および拡大の防止が防災対策の中心となる。この地区には、大規模なタンクは存在しないものの、流出油が防油堤内に拡大して火災となるような事態が発生危険は小さいが想定される。この場合、隣接事業所のみならず、コンビナート区域外に放射熱の影響を与えることも考えられるため周辺地域の安全対策を検討しておく必要がある。地震時においても、近くの海域で発生する地震に対して震度6弱程度の揺れが予想され、過去の地震では大きな被害は出ていないものの、今後施設の老朽化も考えられることから注意が必要である。

5.2 苫小牧地区(西港)

苫小牧地区(西港)には、危険物タンク、可燃性ガスタンク、毒性ガスタンク、プラントといった多様な施設が数多くあり、災害の形態も多様なものとなる。

中でも石油精製プラントでは近年全国的に事故が多発しており事故の発生防止が重点対策となる。地震時においては、石狩低地東縁断層での地震に対しておおむね震度6弱(一部6強)の揺れが予想され、また特に十勝沖(千島海溝沿い)の地震に対しては大きな長周期地震動が予想される。したがって、旧法タンクや準特定タンクの耐震改修等の強震動対策とあわせて、長周期地震動に伴うスロッシング対策を促進する必要がある。この地区には、大規模な施設もあり災害が発生したときの影響も大きくなるが、立地条件からコンビナート区域外に影響を与えることはほとんどない。ただし、毒性ガスが漏洩した場合には、施設や気象条件によってはコンビナート区域外に多少の影響を及ぼす可能性も否定できないため注意が必要である。

5.3 苫小牧地区(東部)

苫小牧地区(東部)は石油備蓄基地であり、危険物タンクでの漏洩や火災の発生および拡大の防止が防災対策の中心となる。この地区では、地震(石狩低地東縁断層帯の地震)が発生した場合にはおおむね震度6強の非常に強い揺れが予想されるが、備蓄タンクはすべて新法タンクであるため大きな被害は想定されない。また、十勝沖(千島海溝沿い)での地震に対しては強震動よりもスロッシングによる被害が問題になるが、屋根はすべてダブルデッキ型であることから、浮き屋根が沈降して全面火災に至る可能性は小さいといえる。この地区ではきわめて強い地震動に対する従業員の安全対策を講じて、地震後できるだけ早くタンクの被害確認や応急対策が行えるように対処しておくことが重要になる。

5.4 室蘭地区

室蘭地区も苫小牧地区(西港)と同様に多様な施設が数多くあり、石油精製プラントでの事故発生防止が重点対策となる。タンクやプラントでの災害の影響がコンビナート区域外に及ぶ可能性はほとんどないが、硫黄タンクが火災となったときには気象条件によっては多少の影響を与えることも考えられ注意が必要である。地震時においては、近くに震源となる断層がなく、地盤が比較的強固なこともあって予想される地震動はおおむね震度5弱～5強であり、コンビナート施設で被害が発生する可能性は非常に小さいと考えられる。長周期地震動についても、過去の地震ではスロッシングによる被害が出るほどの揺れはなく、地震に関しては比較的安全な場所に立地しているといえる。ただし、全国的に見ると確認されていない断層で強い地震が発生したことも多くあり、旧法タンクや準特定タンクの耐震改修といった基本的な地震対策は講じておく必要がある。

5.5 上 磯 地 区

上磯地区では、危険物タンクでの漏洩や火災の発生および拡大の防止が防災対策の中心となる。一部のタンクでは、流出油が防油堤内に拡大して火災となった場合（可能性は小さいが）、コンビナート区域外に放射熱の影響を与えることも考えられ、周辺地域の安全対策を検討しておく必要がある。このほかに、可燃性ガスの漏洩に対しても、影響範囲は小さいが近くに民家などがあるため注意が必要である。地震時においては、函館平野西縁断層での地震に対しておおむね震度6弱程度の揺れが、また日本海東縁部の地震に対して大きなスロッシングが予想されることから、旧法タンクや準特定タンクの耐震改修等の強震動対策とあわせてスロッシング対策を促進する必要がある。

5.6 知 内 地 区

知内地区にあるのは火力発電所だけである。近年全国的に火力発電所での火災等の事故が多く発生しており、当該地区においても特に発電施設での事故発生防止が重点対策となる。地震時においては、上磯地区と同様に、函館平野西縁断層での地震に対しておおむね震度6弱程度の揺れが予想されるが、危険物タンクはすべて新法タンクであることから大きな被害は想定されない。スロッシングに関しては、十勝沖地震（2003）の記録しか得られていないが、被害はほとんど発生しないと考えられる。またタンク等で発生した災害の影響がコンビナート区域外に及ぶ可能性は小さいが、毒性ガスが漏洩したときの影響はかなり大きくなるため、事業所周辺の安全確保に配慮する必要がある。

6. お わ り に

本稿では、平成16年度に実施した北海道における石油コンビナート防災アセスメントの手法と評価結果について述べた。北海道では、平成16年度（後半）

にこのアセスメント結果を参考に防災計画の見直しを行い、さらに平成17年度には地区別の防災対策要綱を作成し、コンビナート災害の発生や拡大の防止に力を注いでいるところである。

なお、スロッシングに関しては、平成17年1月に法令（危険物の規制に関する規則）の一部改正が行われ、予想される速度応答スペクトル特性に応じた空間容積の確保、浮屋根（ポンツーン）の強化対策等が一定の猶予期間を設けて義務づけられることになった。今後、これらの対策が講じられた場合には、スロッシングによるタンク全面火災や大規模な流出火災の発生危険はかなり低減されることが予想される。

最後に、このアセスメントを実施するにあたって助言をいただいた、上原陽一横浜国立大学名誉教授を始め北海道石油コンビナート等災害想定検討会の委員の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 北海道：北海道石油コンビナート等特別防災区域災害想定調査報告書（平成17年3月）
- 2) 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（平成13年）
- 3) 山瀬敏郎：石油コンビナートの防災アセスメント、安全工学、40-1, pp.22-29（2001）
- 4) 座間信作、西 晴樹、畑山 健：地震動の石油タンク損傷能力指標と危険度評価、消防研究所報告第94号（2002）
- 5) 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（平成7年4月）
- 6) 消防研究所：阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書（平成8年3月）
- 7) U.S.Nuclear Regulatory Commission：Reactor Safety, An Assessment of Accident in U.S.Commercial Nuclear Power Plants（1975）
- 8) Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers：Guidelines for Process Equipment Reliability Data With Data Table（1989）