

## 第6章 長周期地震動による災害評価

### 6.1 想定する災害シナリオ

#### 6.1.1 浮き屋根式タンク

長周期地震動による浮き屋根式タンクの災害シナリオとして、消防庁防災アセスメント指針では初期事象を

- 浮き屋根上への流出
- 浮き屋根の損傷・沈降
- タンク内のドレン配管の破損

として、下図の災害シナリオを示している。

浮き屋根式のタンクでは、想定を上回る波高のスロッシングが生じた場合に内容物が溢流する可能性がある。

また、スロッシングにより浮き屋根がタンク側板等に衝突して、リング火災、あるいは浮き屋根が沈没してタンク全面火災となる可能性がある。

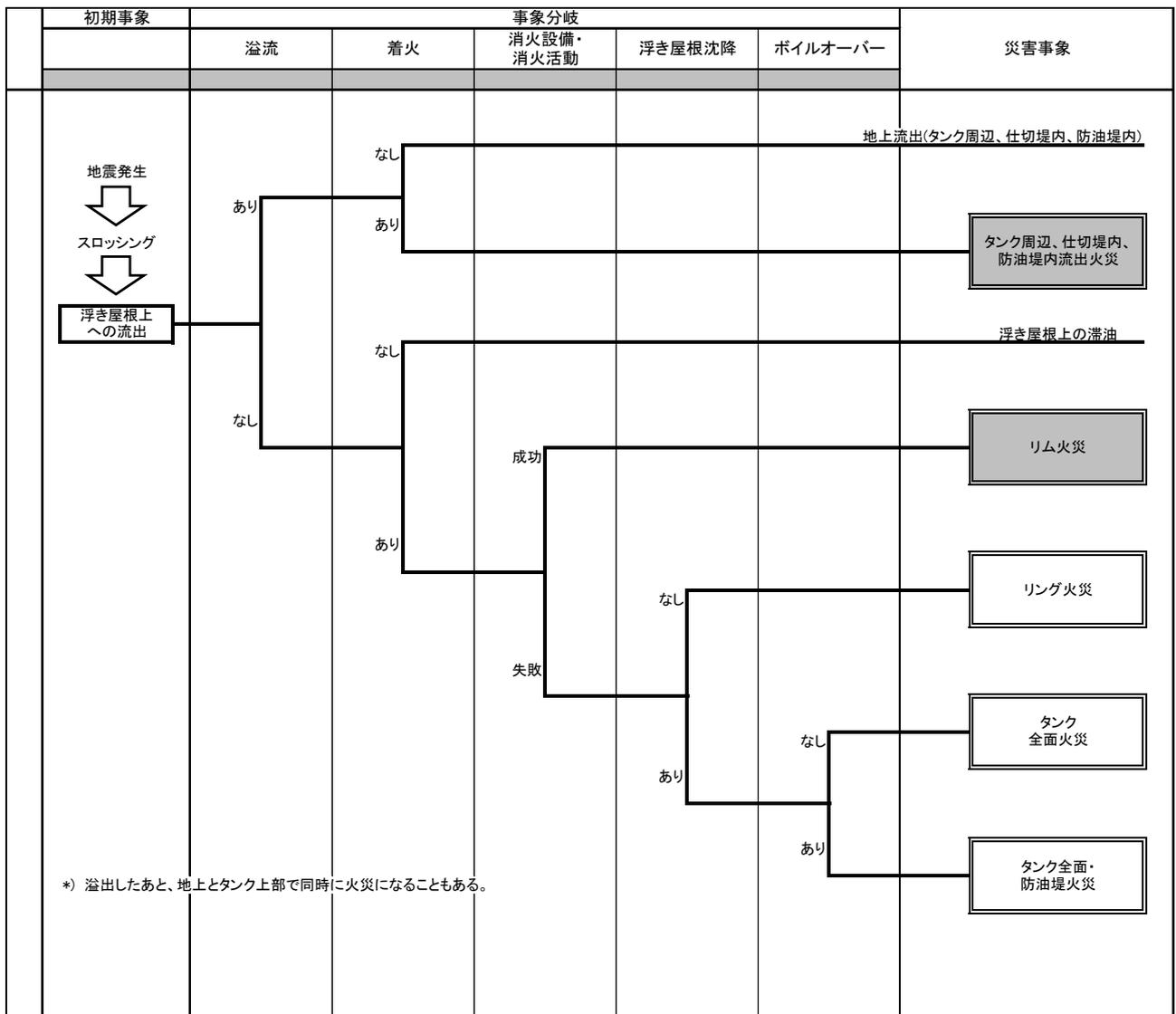


図 6.1 浮き屋根上への流出による災害シナリオ

浮き屋根式タンクでは、スロッシングが生じると、余裕空間高を上回る内容物がタンク側板や付属設備に衝突することにより、タンク側板や屋根の変形・破損、浮き屋根上への油の滞留、浮き屋根の沈没等が生じる恐れがある。

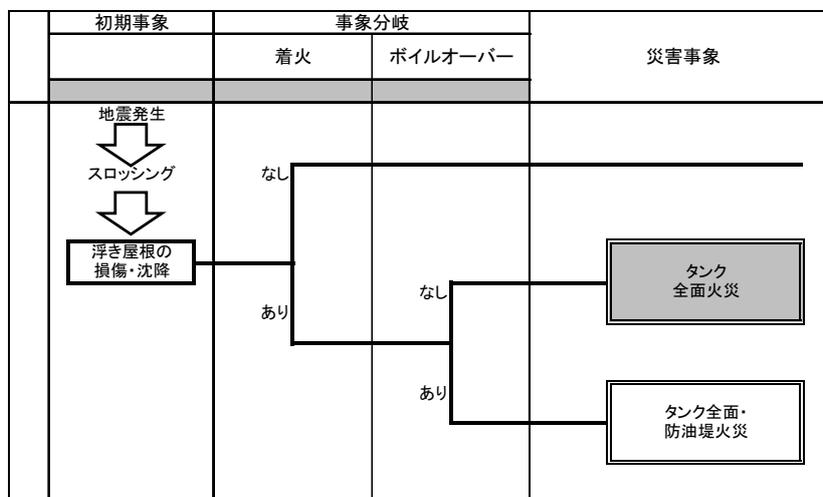


図 6.2 浮き屋根の損傷・沈降による災害シナリオ

また、浮き屋根式タンクでは、浮き屋根上に漏洩した油がドレン排水口から流出したり、タンク内部でドレン配管が破損して排水口から流出するような事象が考えられる。

前者の場合には流出量は小量にとどまるが、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。

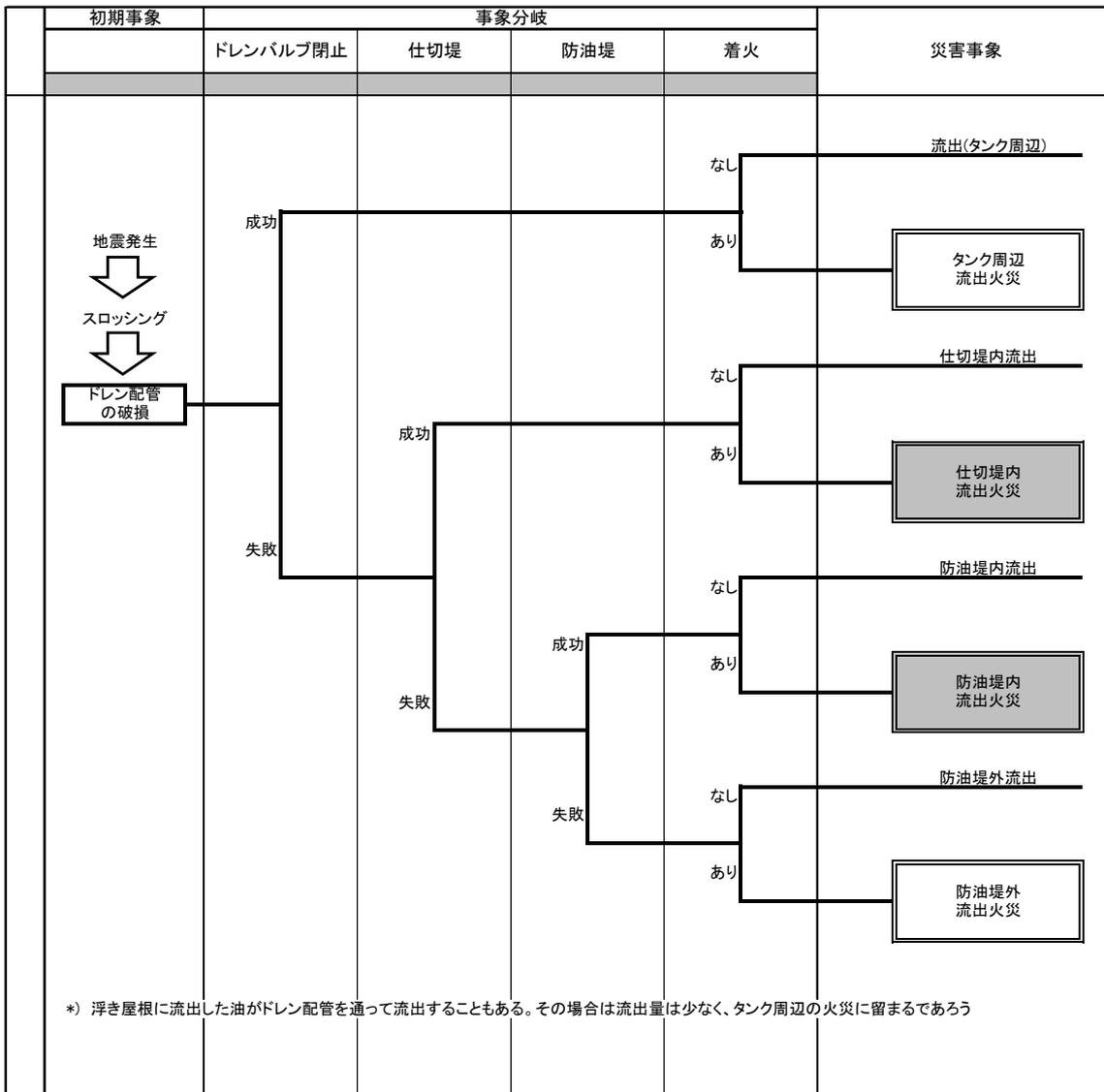


図 6.3 タンク内のドレン配管の破損による災害シナリオ

### 6.1.2 内部浮き蓋付きタンク

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

2003年十勝沖地震での内部浮き蓋付きタンクの被害では、スロッシング波高が2m以上になると被害が顕著になることが確認されている。（消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書、2011）

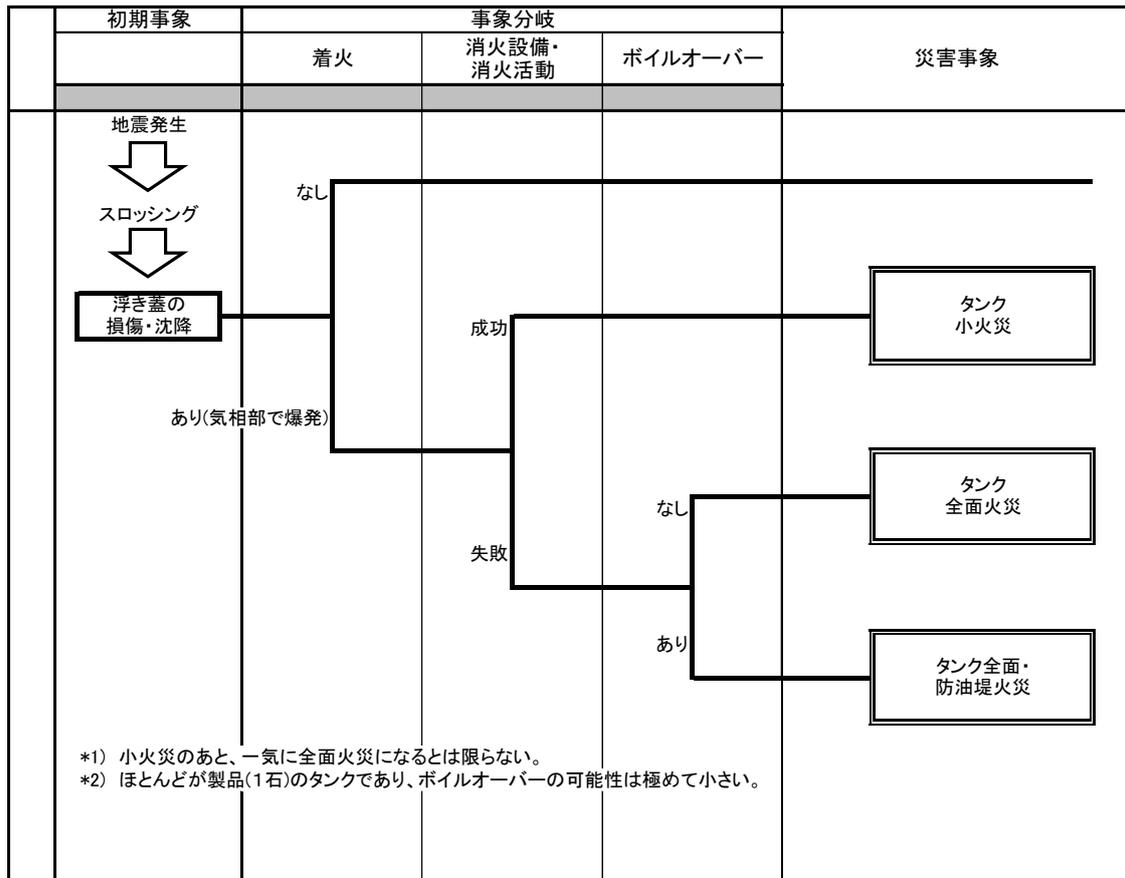


図 6.4 浮き蓋の損傷・沈降による災害シナリオ

### 6.1.3 固定屋根式タンク

固定式屋根式タンクの屋根は放爆構造がとられていることから、スロッシングにより内容物が屋根に衝突すると、側板との接合部を破損し内容物が溢流する可能性がある。

消防庁指針では、このような事例は 1964 年の新潟地震で確認されており、容量 20,000kℓ、直径約 45m の固定屋根式タンク 2 基において、総量約 2,000 kℓの重油が防油堤内に溢流している。

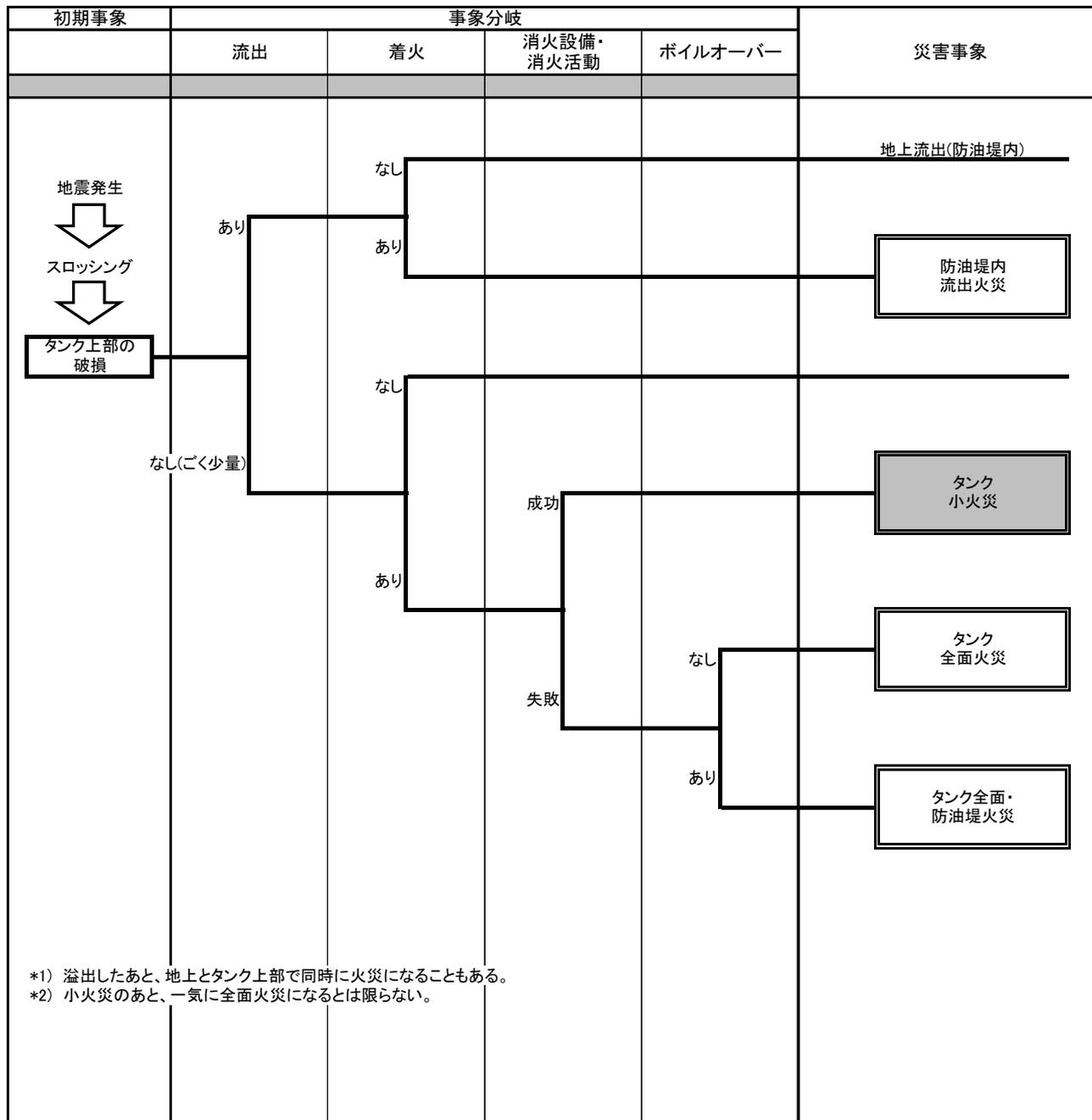


図 6.5 タンク上部の破損による災害シナリオ

## 6.2 長周期地震動による被害の評価方法

### 6.2.1 スロッシングによる最大波高の推定及び溢流量の算定

浮き屋根式タンク及び内部浮き蓋付きタンクを対象として、速度応答スペクトル法を基にスロッシングによる溢流危険性を評価する。応答スペクトルとは、いろいろな固有周期を持つさまざまな建物や構造物に対して、地震動がどの程度の強さの揺れ（応答）を生じさせるかを示すもので、建物や構造物と同じ特性（固有周期と減衰定数）を持つ揺れの最大値として算定される。

速度応答スペクトル法の評価式を以下に示す。

$$\eta = 0.837 (D/2g) (2\pi/T_s) S_v(T_s) \quad (\text{式 1})$$

$$T_s = 2\pi \{ (D/3.682) \coth (3.682H/D) \}^{1/2} \quad (\text{式 2})$$

$\eta$  : スロッシング最大波高 (m)

$T_s$  : タンクのスロッシング基本固有周期 (s)

$D$  : タンク内径 (m)

$H$  : 液面高さ (m)

$g$  : 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)

$S_v(T_s)$  : 周期 $T_s$  における速度応答スペクトル (m/s)

また、式 1 は微小波高を仮定したもの（線形解）であり、溢流が生じるような大きなスロッシングの場合は、非線形性の影響による波高増分を考慮する必要がある。

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

$$\begin{aligned} \eta_+ &= \eta + \Delta\eta \\ \Delta\eta &= 0.91R(\eta/R)^2 \end{aligned} \quad (\text{式 3})$$

$\eta_+$  : 非線形性を考慮したスロッシング最大波高 (m)

$\eta$  : スロッシング最大波高 (式 1 による線形解 : m)

$\Delta\eta$  : 非線形液面増分 (m)

$R$  : タンク半径 (m)

溢流量は、式 4 を用いて算定する。

$$\delta_v = \delta_h \cdot (R - r_0) \cdot R\theta_0 \quad (\text{式 4})$$

$\delta_v$  : 溢流体積(図の斜線で示す部分)

$\delta_h$  : 溢流高さ

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

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

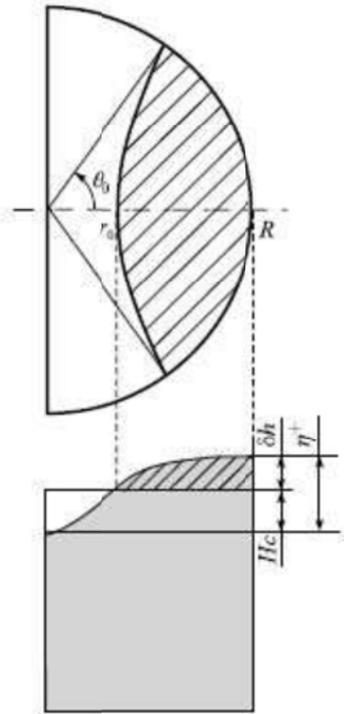


図 6.6 非線形スロッシングによる溢流量の模式図

## 6.2.2 速度応答スペクトルの設定

内閣府で想定している南海トラフの海溝型巨大地震は、1,000年に一回発生する低頻度災害事象であるが、ひとたび発生すると甚大な被害が生じる。

独立行政法人防災科学技術研究所では、長周期地震動予測地図作成支援事業において、南海トラフの海溝型巨大地震を想定した約100通りのシナリオに対して長周期地震動シミュレーションを実施している。

本評価では、調査時点で、公的機関が公表しているもので、南海トラフ海溝型巨大地震に関して長周期について考慮された最新の予測波形である、独立行政法人防災科学技術研究所提供の内閣府最大クラスのEW、NS（水平動）地震動波形を用い、速度応答スペクトルを設定し、タンク固有周期 $T_s$ における速度応答スペクトル $S_v(T_s)$ を設定した。

本評価で対象とした速度応答スペクトルは、平成19年度調査で前提とした長周期地震動の速度応答スペクトル（周期に関係なく $S_v: 113\text{cm/s}$ ）よりも、周期10秒以上で大きく上回っている。

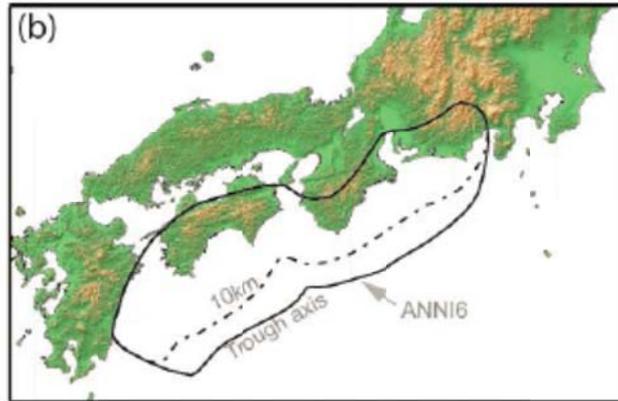


図 6.7 震源域

表 6.1 シミュレーション(差分法)の概要

地下構造モデル	全国1次地下構造モデル(暫定版)(地震調査委員会、2012) □ 第1層の物性値を第2層の物性値で置換しているため、出力記録はVs500m/s上での地動速度
格子間隔	不連続格子 (Aoi and Fujiwara, 1999)
	水平方向 200m、深さ方向 100m (第1領域: 深さ 0~8 km)
	水平方向 600m、深さ方向 300m (第2領域: 深さ 8~70 km)
	格子数: 3498×5448×81+1166×1816×207≒20億格子 Q値の参照周期: 5秒
Q値の参照周期	5秒
時間間隔	0.008333秒 (約120 Hz)
タイムステップ数	60000ステップ (=500秒間)
計算波形の有効周期帯	2秒以上
波形の計算地点	愛媛県庁 (EHM)

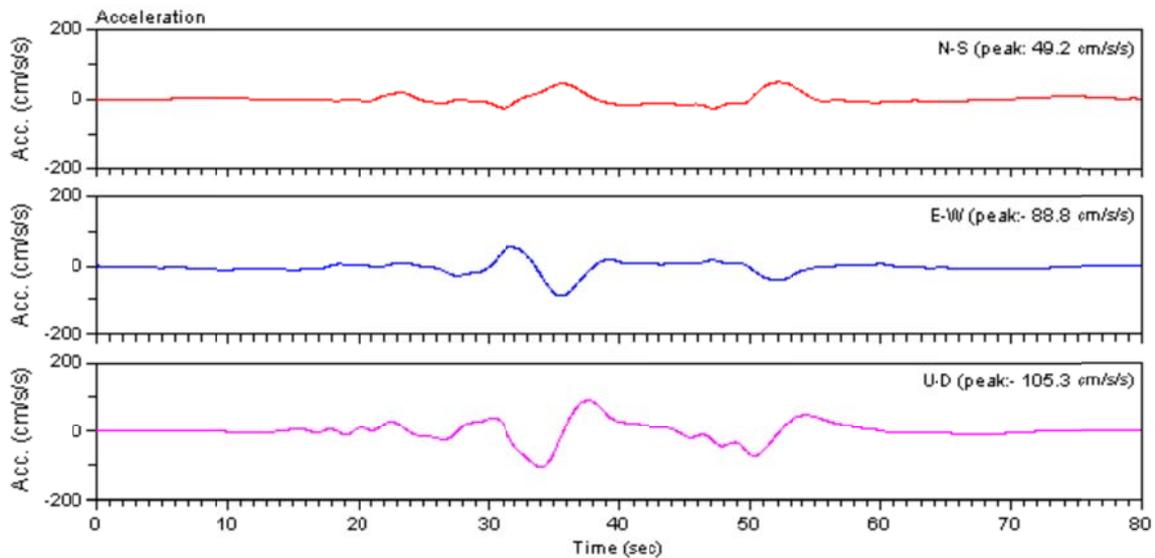
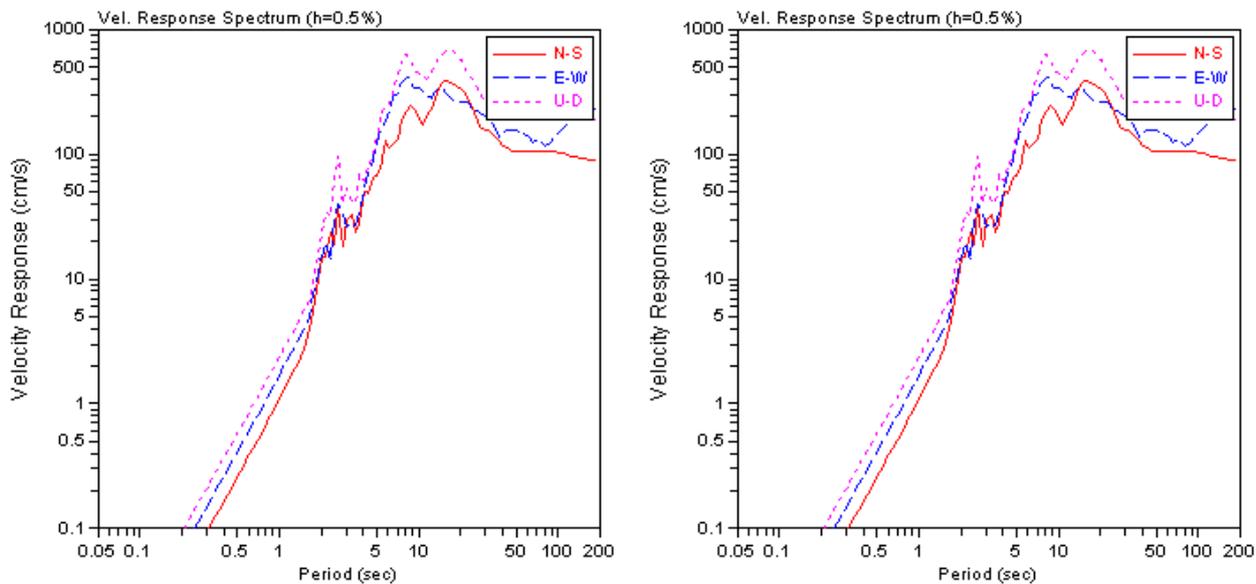


図 6.8 加速度時刻歴



(減衰 0.1%)

(減衰 0.5%)

図 6.9 速度応答スペクトル

### 6.3 スロッシング最大波高の算定

本評価では、すべて危険物タンクを対象に算定を行う。

愛媛県石油コンビナート地区における危険物タンク数及び固有周期を下表に示す。

表 6.2 石油コンビナート地区における危険物タンク数

地区名称	浮き屋根式	内部浮き蓋式	固定屋根式	総計
新居浜地区	0	6	64	70
波方地区	4	0	4	8
菊間地区	42	10	34	86
松山地区	37	8	75	120
総計	83	24	177	284

表 6.3 石油コンビナート地区における危険物タンクの固有周期

地区名称	タンク固有周期 ～5 (sec)	タンク固有周期 5～10 (sec)	タンク固有周期 10～ (sec)	総計
新居浜地区	65	5	0	70
波方地区	2	6	0	8
菊間地区	51	31	4	86
松山地区	61	58	1	120
総計	179	100	5	284

次表に、タンクの余裕空間高を超えるため、溢流の可能性があるものにおけるスロッシング最大波高

及び基数を示す。

表 6.4 タンクの余裕空間高を越えるスロッシング最大波高及びタンク基数

	浮き屋根式		内部浮き蓋式		固定屋根式	
	スロッシング 最大波高 (m)	タンク 基数	スロッシング 最大波高 (m)	タンク 基数	スロッシング 最大波高 (m)	タンク 基数
新居浜地区	—	0	0.58	1	0.12~0.86	5
波方地区	7.47	3	—	0	1.66	3
菊間地区	0.16~7.41	27	0.15~0.39	2	0.33~7.47	16
松山地区	0.15~6.43	21	0.15~1.22	2	0.17~2.27	28
計		51		5		52

## 6.4 浮き屋根式タンクの災害想定

### 6.4.1 浮き屋根上への流出による災害

#### A. 溢流量の推定

下表に浮き屋根式タンクの溢流量及び溢流タンク基数を示す。

溢流するタンクは、引火点の低い第1石油類を貯蔵し、タンク周辺の溢流（溢流量が10 kℓ未満）にとどまるものは4基、仕切堤内に流出するものが26基、防油堤内に流出するものが17基である。

第1石油類以外を貯蔵するタンクでは、防油堤内に流出するものが4基である。

なお、仕切堤高さを30cmとして、溢流量が仕切堤容量を越える場合は、または、仕切堤がない場合は、防油堤内に流出するとした。

表 6.5 溢流量及び溢流タンク基数

	第1石油類						第1石油類以外			
	タンク周辺流出		仕切堤内流出		防油堤内流出		仕切堤内流出		防油堤内流出	
	溢流量 (m <sup>3</sup> )	基数								
新居浜地区	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
波方地区	—	—	—	—	8200	1	—	—	8200	2
菊間地区	3~6	2	29~ 44	7	3600 ~ 9900	16	—	—	2500 ~ 4200	2
松山地区	2	2	15~ 6200	19	—	—	—	—	—	—
計		4		26		17				4

#### B. 溢流による流出火災

溢流による流出火災は、引火点の低い第1石油類を貯蔵するタンクで発生し、溢流量が10 kℓ未満のタンクについては、タンク周辺の流出にとどまるため、流出火災は発生しないと考えられる。

また、防油堤内火災については、溢流量が数千 kℓと多いため、防油堤内火災の放射熱によりタンク火災が発生するとし、災害事象はタンク全面火災も合わせた防油堤内火災とした。

影響距離を定める基準については、露出人体に対する危険範囲として、1 分間以内で痛みを感じる強度（2.3kW/m<sup>2</sup>）を用いた。

下表に流出火災の地区別の放射熱影響距離を示す。

表 6.6 流出火災の地区別災害事象の放射熱影響距離

	仕切堤内流出		防油堤内流出	
	災害事象	影響距離 (m)	災害事象	影響距離 (m)
新居浜地区	—	—	—	—
波方地区	—	—	タンク全面・防油堤火災	260
菊間地区	仕切堤内の火災	150～210	タンク全面・防油堤火災	200～450
松山地区	仕切堤内の火災	100～400		

評価結果を踏まえ、流出火災による特別防災区域外に影響が及ぶことが懸念される地域は以下のとおりとなる。

地区名	重点区域
波方地区	波方町宮崎の一部
菊間地区	菊間町種の一部
松山地区	大可賀1丁目から3丁目の一部、海岸通の一部、別府町の一部

### C. タンク火災

溢流しない場合でも、引火点の低い第1石油類を貯蔵する浮き屋根式タンクにおいて、消火設備・消火活動が行えず、リング火災に進展し、さらに浮き屋根が沈降し、タンク全面火災に進展する可能性もあるが、溢流しない評価対象タンクでは、消火設備（自動起動、非常用電源有）が設置されているため、リム火災でとどまるものと想定される。

影響距離を定める基準については、露出人体に対する危険範囲として、1 分間以内で痛みを感じる強度（2.3kW/m<sup>2</sup>）を用いた。

下表に地区別のリム火災が発生するタンク基数及び放射熱影響距離を示す。

表 6.7 リム火災が発生するタンク基数及び放射熱影響距離

	基数	影響距離 (m)
新居浜地区	—	—
波方地区	—	—
菊間地区	14	4～8
松山地区	15	7～8

#### 6.4.2 浮き屋根の損傷・沈降による災害

引火点の低い第1石油類を貯蔵する浮き屋根式タンクでは、浮き屋根が沈降した場合に全面火災となる危険性が大きいと言える。

全面火災に至る引き金となる事象としては、浮き屋根上への油の漏洩や浮き屋根ポンツーンの損傷な

どがある。

消防庁防災アセスメント指針では、2003年十勝沖地震での苫小牧における危険物タンクの被害状況甚大な被害またはその恐れのあるタンクは、最大波高は2m以上であったとしている。

本評価では、最大波高2m以上のタンクで、タンク全面火災し、ボイルオーバーによりタンク全面・防油堤火災には進展するとした。

影響距離を定める基準については、露出人体に対する危険範囲として、1分間以内で痛みを感じる強度(2.3kW/m<sup>2</sup>)を用いた。

下表に地区別のタンク全面・防油堤火災に至るタンク基数及び放射熱影響距離を示す。

表 6.8 タンク全面・防油堤火災に至るタンク基数及び放射熱影響距離

	基数	影響距離 (m)
新居浜地区	—	—
波方地区	1	260
菊間地区	16	200～450
松山地区	9	220～330

評価結果を踏まえ、タンク全面・防油堤火災による特別防災区域外に影響が及ぶことが懸念される地域は以下のとおりとなる。

地区名	重点区域
波方地区	波方町宮崎の一部
菊間地区	菊間町種の一部
松山地区	大可賀2丁目、3丁目の一部、海岸通の一部

#### 6.4.3 ドレン排水口からの流出

浮き屋根式タンクでの、スロッシング波高の平均値は、約3.7mと大きく、ドレン配管は破損することが想定されるため、引火点の低い第1石油類を貯蔵するタンクについては、仕切堤内火災もしくは防油堤内火災が発生すると考えられる。

影響距離を定める基準については、露出人体に対する危険範囲として、1分間以内で痛みを感じる強度(2.3kW/m<sup>2</sup>)を用いた。

下表に、地区別のタンク内部でドレン配管が破損し、排水口からの流出を想定した放射熱影響距離を示す。

表 6.9 タンク内部でドレン配管が破損し、排水口からの流出を想定した災害事象の放射熱影響距離

	仕切堤内流出		防油堤内流出	
	基数	影響距離 (m)	基数	影響距離 (m)
新居浜地区	—	—	—	—
波方地区	1	170	—	—
菊間地区	25	80～240	12	170～250

松山地区	20	100～400	11	170～250
------	----	---------	----	---------

評価結果を踏まえ、ドレン配管からの流出による特別防災区域外に影響が及ぶことが懸念される地域は以下のとおりとなる。

地区名	重点区域
菊間地区	菊間町種の一部
松山地区	大可賀2丁目、3丁目の一部、別府町の一部

## 6.5 内部浮き蓋付きタンクの災害想定

2003年十勝沖地震での内部浮き蓋付きタンクの被害では、スロッシング波高が2m以上になると被害が顕著になることが確認されている<sup>17</sup>。（消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書, 2011）

内部浮き蓋付きタンクにおいて、タンクの余裕空間高を超え、溢流の可能性を有するものは5基所在するが、スロッシング最大波高は0.15～1.22mであり、いずれも波高2m未満であり、爆発・火災が発生する可能性は低いと考えられる。

## 6.6 固定屋根式タンクの災害想定

消防庁防災アセスメント指針では、1964年の新潟地震で確認されており、容量20,000kℓ、直径約45mの固定屋根式タンク2基において、総量約2,000kℓの重油が防油堤内に溢流した、としている。

このときのスロッシング最大波高は3m（推定値）、液面上の空間高さは約2mであった。

また、2003年十勝沖地震でも、固定屋根式タンク1基において、側板と屋根接合部を突き破って溢流する事例が確認されている<sup>18</sup>。

スロッシング最大波高が3mを越え、液面上の空間高さが1.5m程度の固定屋根式タンクは、菊間地区において、第1石油類以外を貯蔵するもので6基所在する。

下表に、浮き屋根式タンクの溢流量算定方法と同様の方法を用い算定した、スロッシング最大波高が3mを越えるスロッシング最大波高、溢流量を示す。

表 6.10 固定屋根式タンクでスロッシング最大波高が3mを越えるスロッシング最大波高、溢流量

	スロッシング最大波高 (m)	溢流量 (m <sup>3</sup> )
新居浜地区	—	—
波方地区	—	—
菊間地区	4.8～7.5	2300～6600
松山地区	—	—

固定屋根式タンクにおいて、スロッシングにより内容物が屋根に衝突し、側板との接合部を破損した

<sup>17</sup>消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書, 2011

<sup>18</sup>消防庁危険物保安室：内部浮き蓋付き屋外貯蔵タンクの安全対策に関する検討報告書, 2011。太田外氣晴，座間信作：巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策—, 2005

場合、衝撃による抵抗で、浮き屋根式タンクと比べて溢流量は限定され、流出が広範囲にならないと考えられ、周辺設備からの飛び火等で着火する可能性は低いと考えられる。

また、スロッシング最大波高が 0～3m でも、余裕空間高を上回る内容物の上昇により発生する側板との接合部の破損が軽微であっても、引火点に低い第 1 石油類を貯蔵するタンクの場合は、タンク上部での停油に着火し、タンク小火災が発生、さらに消火設備・消火活動が十分に機能しない場合には、タンク全面火災に進展する可能性がある。

スロッシング最大波高が 0～3m であり、消火設備（自動起動、非常用電源有）を有しない、第 1 石油類を貯蔵するタンクは 2 基所在し、これらはタンク小火災に至るものと考えられる。

影響距離を定める基準については、露出人体に対する危険範囲として、1 分間以内で痛みを感じる強度（2.3kW/m<sup>2</sup>）を用いた。

次表に、タンク上部での停油に着火し、タンク小火災に至るタンク基数及び放射熱影響距離を示す。

表 6.11 タンク上部での停油に着火し、タンク小火災に至るタンク基数及び放射熱影響距離

	基数	影響距離 (m)
新居浜地区	—	—
波方地区	—	—
菊間地区	—	—
松山地区	2	7～11