

東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の教訓 (コンビナートの保安・防災)

有限会社プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠

1. はじめに

1995年に兵庫県南部地震が発生し、神戸市東灘区のコンビナートでは強い地震動と大規模な液状化による被害を受けた。2011年には東北地方太平洋沖地震が発生し、東北地方から東関東にわたる地域の多くのコンビナートで地震動、液状化、津波による被害を受けた。前者の地震はマグニチュード 7.3 の直下型で、後者の地震はマグニチュード 9.0 の海溝型であった。近い将来に発生が予想されている東海・東南海・南海地震(3連動型)は、震源が日本列島に近く、海溝型と直下型の特徴を併せ持つものと予想されている。ここでは、相次いで発生した2つの大地震の被害経験から教訓を得て、きたるべき次の大地震に備えることを考えたい。なお、プラントの被害状況の概要は、公表された報告書を基に作成させていただいた。

2. 東北地方太平洋沖地震による被害からの教訓(その1)

2011年3月11日に三陸沖(牡鹿半島の東南東130km付近)を震源にマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した。被害は東北地方から東関東にわたる広い地域にわたり、仙台、鹿島、千葉、川崎などのコンビナートも被害を受けた。個別プラントの事例から、得られた教訓について述べる。

2.1 石油精製プラントの地震動による被害からの教訓

石油精製プラントで球形貯槽が倒壊し、火災、爆発が起きた。報告書^①を基に、地震発生から BLEVE の発生までの過程を流れ図にして図 1 に示す。

ブレース破断の原因

球形貯槽は、本震でブレースが破断し、余震で柱脚が座屈し、倒壊に至った。ブレース破断の原因は、鋼管ブレースの交差部が軸部に比べて変形しやすい構造をしていたこと、開放検査のために満水状態であったこと、長周期成分を含む継続時間の長い地震動であったこと、の3つの条件が重なり、入力エネルギーが塑性変形によるエネルギー吸収能力の限界を越え、ブレースの破断に至ったものと考えられる。

教訓1 塑性変形によるエネルギー吸収能力の確保

今回と同じような周期特性を有する継続時間の長い地震動であって、加速度が2倍を越えれば、通常の運転状態であっても事故は起こり得る。大地震に備えるには、終局強度設計の理念、考え方を基に、局所に構造的弱点を残さず、弾性限界を越えてからの塑性変形によるエネルギー吸収能力を高める設計(既設のものは改善)が大切。このことは球形貯槽に限定したことはない。

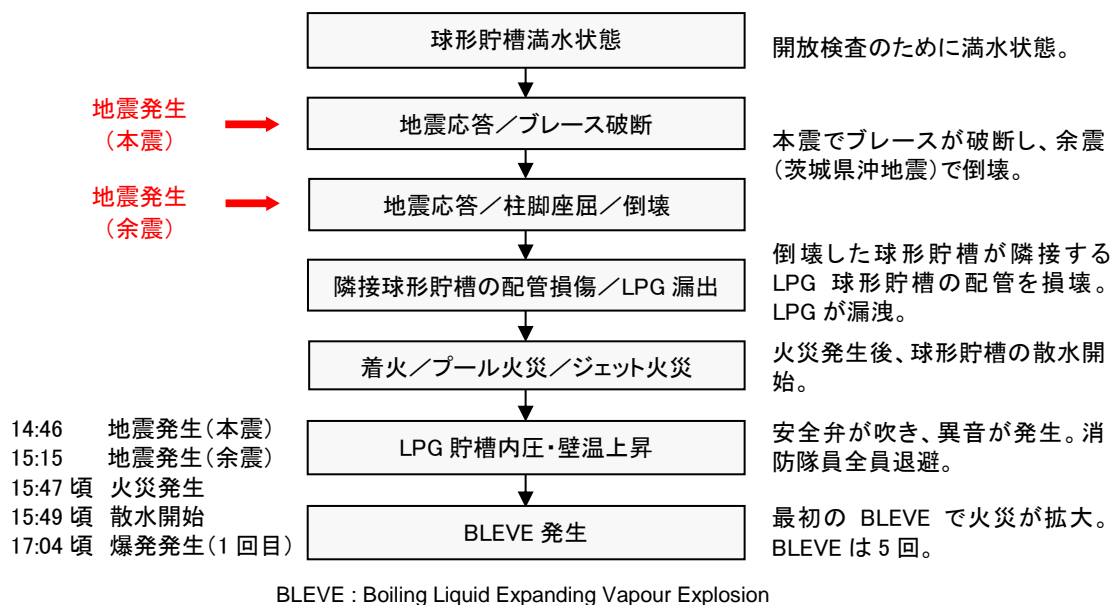


図 1 石油精製プラントにおける球形貯槽の倒壊と BLEVE の発生

教訓 2 水張り状態における耐震安全性の確保

満水状態の液重量は設計重量（比重、規制液位、動的な有効液重量率で計算される）の 3 倍を超える。内容物が水であっても、倒壊して運転中の球形貯槽の配管を損傷させれば火災の危険を生じる。開放検査で満水にすることがあるのであれば、そうした条件を耐震設計で考慮するか、倒壊してもそうした事態にいたらぬよう配慮することが必要。

教訓 3 散水設備の耐震信頼性の確保

球形貯槽が倒壊して LPG が流出した後、プール火災が発生し、次第にジェット火災の様相を示し、77 分後に BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) が発生した。1985 年に MEXICO PEMEX で起きた同種事故では、プール火災が始まって 10-15 分後に BLEVE が発生した。諸条件の違いはあると思われるが、散水による冷却の効果もあったと判断される。散水できていなかったら、BLEVE がもっと早く起き、避難、防災活動に支障をきたしていたかもしれない。散水設備の大地震に対する耐震信頼性^(注)の確保は、延焼防止のみならず、避難、初期消火の時間的猶予の確保のためにも必要。

(注):地震時におけるシステムの信頼性のことをいう。システムはいくつかのサブシステム、システム構成要素より成り、それらが地震時に機能を維持しなければ、システムも機能を維持できない。つまり、システムの耐震信頼性を確保するためには、全てのサブシステム、システム構成要素の耐震信頼性、耐震性を確保しなければならない。なお、本稿では、津波に耐える能力を耐津波性、津波襲来時におけるシステムの信頼性のことを耐津波信頼性と呼ぶこととする。耐震信頼性の場合に同じく、サブシステム、システム構成要素の耐津波信頼性、耐津波性を確保しなければ、システムの耐津波信頼性を確保することはできない。

教訓 4 事業所間のリスクコミュニケーション

BLEVE によってタンクの破片が飛散した。また、隣接事業所にも飛び火した。BLEVE や有毒性ガス拡散など、隣接事業所に被害が及ぶリスクが潜在している場合には、それぞれの立場で防護策を講じたり、また、円滑な避難ができるよう、リスクを共有化することが望ましい。

2. 2 石油化学プラント・化学プラントの安全停止の事例からの教訓

今回の地震では、多くの事業所でプラントを自動、手動で安全に停止している。報告書^{(2),(3),(4)}を基に、石油化学プラント及び化学プラントの事例について、地震発生から運転停止、安全確認までの経過を流れ図にして図 2、図 3 に示す。

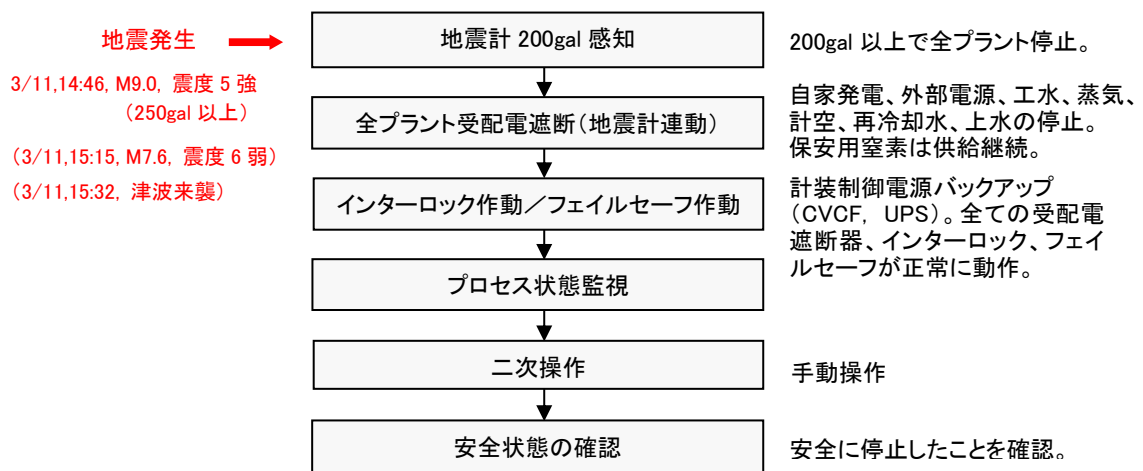


図2 石油化学プラントの自動停止の事例

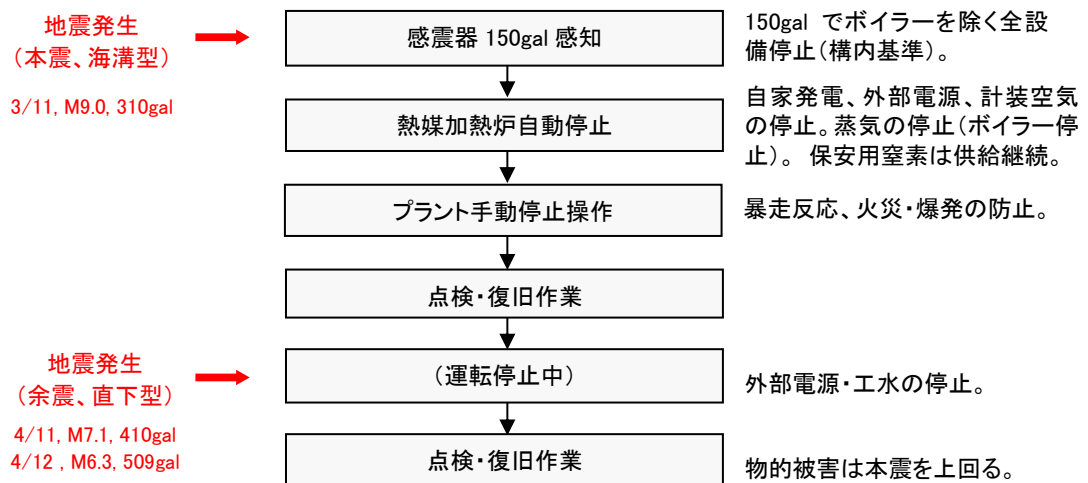


図3 化学プラントの自動・手動停止の事例

教訓 1 外部電源・工業用水の停止を前提とした防災計画

大地震では、外部電源、工業用水（工水）ともに停止する可能性が高い。大地震における安全な運転停止と保安、そして防災は、外部電源、工業用水の停止を前提に計画することが必要。

教訓 2 保安用窒素設備の耐震性・耐震信頼性の確保

両事業所ともに、保安用窒素の供給が維持されたことにより、プラントを安全に停止することができた。安全な運転停止に窒素が欠かせないプラントでは、保安用窒素供給設備（構内窒素配管を含む）の大地震に対する耐震性・耐震信頼性の確保が必要。

教訓 3 保安用用役供給設備の耐震性・耐震信頼性の確保

安全な運転停止に必要とされる用役はプラントの種類によって異なる。必要とされる保安用用役につき、供給設備の大地震に対する耐震性・耐震信頼性の確保が必要。

教訓 4 震度が本震を上回る余震への備え

鹿島、いわき市ともに、最大加速度は余震が本震を上回った。海溝型地震では余震の規模も大きく、震源は広域にわたり、震源が陸地であれば直下型地震となる。海溝型地震の場合には、運転を停止した後も、余震に備えた防災体制が必要。

2.3 石油精製プラントの津波による被害からの教訓

石油精製プラントが、地震で運転を停止した後、津波に襲われた。交流電源の喪失によって運転中の大型石油タンクの緊急遮断弁は閉止機能を失い、手動による閉操作の時間的余裕もなく、緊急避難した。運転中の中・小型のタンクで元弁が開状態のものも同様であった。避難指示が出ている中で、火災が発生した。報告書⁶⁾を基に、地震の発生から火災の鎮火までの経過を流れ図にして図 4 に示す。

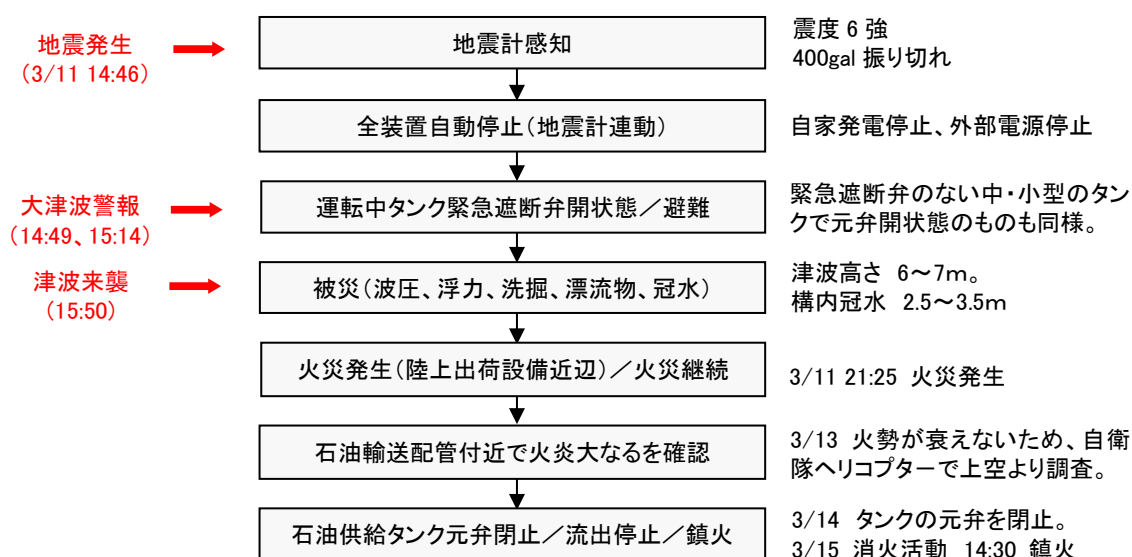


図4 石油精製プラントの津波による火災発生と鎮火

火災発生の概況

火災は津波が来襲してから5時間半後に石油ローリー出荷設備付近で発生し、LPG 出荷設備、ガソリンタンク、アスファルトタンク、サルファータンクに延焼した。

教訓1 危険物・高圧ガス等の大規模な漏洩の防止

大津波の来襲時は人の手による防災活動はできない。コンビナートの津波火災を防ぐには、危険物等（危険物、高圧ガス、毒物・劇物）が広範囲に流出、拡散することのないよう、津波による大規模な漏洩事故を起こさないことが大切。

教訓2 緊急遮断弁等の遠隔操作弁の耐震信頼性の確保

数多くの緊急遮断弁等の動力を同一電源に依存する場合には、非常用発電設備（非常用を兼ねる常用を含む）及び構内電気設備（電気の供給経路）について、大地震に対する耐震信頼性の確保が必要。フェイルセーフの動力を個別に備えれば、緊急遮断弁の耐震信頼性はより高いものとなる。

教訓3 津波警報発令時の離栈・避難・連絡・情報収集に関する教訓

報告書⁵⁾には、栈橋作業中の緊急避難、広大なエリアにわたる作業員の緊急避難、津波襲来後の通信手段、電力喪失後の津波情報収集、夜間の退避、消防車両の退避、津波避難訓練などについて、経験から得られた教訓が述べられている。

教訓4 設備の耐津波設計に関する教訓

プラントが大津波に襲われたのは日本では初めてのことであり、設備の耐津波設計に関する多くの教訓が得られた。これについては3.4でまとめて述べる。

2.4 排ガス燃焼設備の機能維持に関する事例からの教訓

石油精製プラントのLPGタンクヤードでは、地震及び津波の影響を受けながら、フレアースタックの燃焼機能が維持され、BOGの地上降下を免れた。その過程を流れ図にして図5に示す。

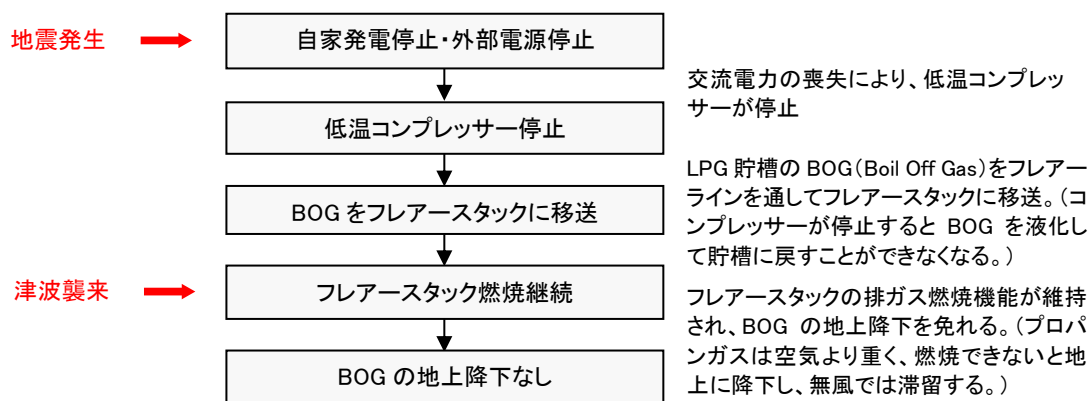


図5 フレアースタックの燃焼機能の維持

教訓1 フレアースステムの耐震信頼性、耐津波信頼性の確保

可燃性の排ガスを燃焼して大気に放出するフレアーステムは、地震時及び地震後において機能が維持されるよう、大地震に対する耐震信頼性と、大津波に対する耐津

波信頼性の確保が必要。空気より重い排ガスを燃焼させる場合は特に重要。（グラウンドフレアーによる排ガス燃焼の場合には、津波による影響について別途検討が必要と思われる。）

2.5 石油岩盤備蓄基地の大津波による被害からの教訓

地下岩盤タンク方式の久慈国家石油備蓄基地（容量 175 万 kl）が大津波に襲われ、地上設備（受配電設備、非常用発電機、廃水処理設備等）が壊滅的な被害を受けた。3階建ての管理棟は2階床上まで浸水し、3階計器室は無事であった。サービストンネル坑口の防潮扉を閉止し、地下備蓄タンクの被災は免れた。報告書⁶⁾を基に、地震の発生から仮設設備運転による原油漏洩未然防止までの経過を流れ図にして図6に示す。

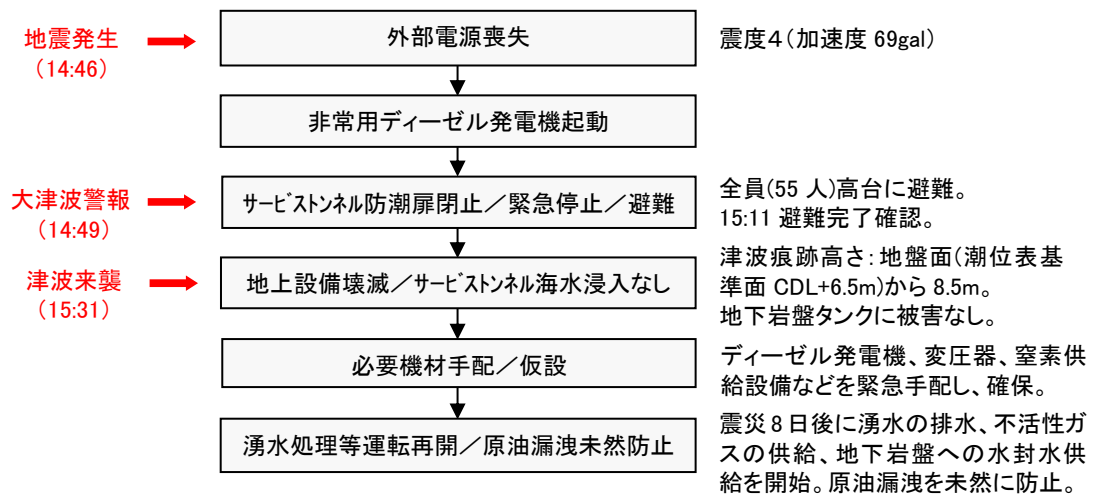


図6 石油岩盤備蓄基地の大津波による被災と応急対策による原油漏洩回避

教訓1 サービストンネル防潮扉閉止システムの耐震信頼性の確保

基地の震度は低かったが（震度 4）、外部電源が停止し、非常用発電機が自動起動した。大津波警報が出て、計器室からボタン操作でサービストンネルの防潮扉を閉め、地下岩盤タンク関連設備の津波による被災を免れた。同種の基地では防潮扉の閉止が防災の要であり、防潮扉閉止システム（電源を含む）の大地震に対する耐震信頼性の確保が重要。

教訓2 定期的な津波避難訓練の実施

基地では年に3回津波避難訓練を実施していた。大津波警報が出てから22分後に全員（55人）の避難完了を高台で確認し、その20分後に津波が来襲した。平時の訓練が功を奏した。

教訓3 計器室の上層階配置

地上の受配電設備や計装ケーブルは被災したが、3階の計器室は無事であった。岩盤タンクの安全運転の維持のため、応急的に現場計測を続け、受電の開始とともに地上部と計器室間の計装設備を復旧し、運転監視装置による自動計測を早期に再開できた。計器室を3階に配置していたことが功を奏した。

教訓 4 地下岩盤タンクの湧水処理に関する教訓

基地の地下岩盤タンクは常圧貯蔵横穴水封固定水床式で、岩盤からの湧水の排水を継続しないと原油の液位が上昇し、外部への漏洩の危険を生じる。地上設備が壊滅した後、ただちに必要機材を手配し、震災 8 日後には仮設設備で運転を再開し、そうした事態を未然に防いだ。報告書には、その時の防災活動から得られた教訓が述べられている。

3. 東北地方太平洋沖地震による被害からの教訓（その 2）

東北地方太平洋沖地震によって危険物施設、高圧ガス設備等が受けた被害は関係機関から報告されている^{(7),(8),(9)}。ここでは、一般事例及び東北地方太平洋沖地震の特徴から得られた教訓を、地震動^(註)、液状化、津波によるものに分けて述べる。

(注)：新潟地震で液面揺動によるタンク火災を経験し、長周期の地震動への取り組みが始まった頃、長周期地震動と言えは地震学で周期 20 秒以上の地震動のことを言っていた。そのため、平底貯槽の液面揺動に影響を及ぼすような、周期が数秒から十数秒の地震動は“やや長周期地震動”と呼ばれていた。最近では、周期 2,3 秒を境に(明確な区分はない)、それより短周期の地震動は短周期地震動、それより長周期の地震動は長周期地震動と呼ばれることが多くなった。本稿も、両者を区別するときはこの呼称を用いる。

3.1 短周期地震動による設備の被害からの教訓

教訓 1 塔槽類、架構構造物の塑性変形によるエネルギー吸収能力の確保

短周期地震動による塔槽類の被害には、球形貯槽のブレース破断の他に、反応塔架台基礎座屈、塔槽類アンカーボルト破断、平底円筒形貯水槽の象の脚座屈などがあつた。エネルギー吸収能力の確保に関する教訓については 2.1 で述べたとおりである。象の脚座屈については 4.2 で述べる。

教訓 2 定性的配慮による配管系の耐震性確保

短周期地震動による配管系の被害には架構支持ベッセルの頂部配管破断、ボイラー配管の亀裂発生、配管・自動弁のサポートからの落下などがあつた⁽⁴⁾。配管系の地震被害は接続される設備の種類に応じてパターンがあり、多くは定性的配慮だけで耐震性を確保できる。過去の地震被害に学ぶことが大切⁽¹⁰⁾。

教訓 3 設備の耐震性評価式の安全裕度の検証

震源に近い仙台の石油精製プラント(仙台市宮城野区港)では、最大加速度 400gal 越えを記録し、事務所建屋も耐震補強ブレースが全て破断した⁽⁶⁾。同じ沖積平野に位置する近隣の観測所(仙台市若林区卸町、仙台市宮城野区苦竹)で記録された地震動の速度応答スペクトル^{(11),(12)}を見ると、兵庫県南部地震における JR 鷹取の地震動(震災の帯と言われる震度 7 の地域で観測された地震動)ほどの破壊力はないが、JMA 神戸の地震動(震度 6。現在の計測震度 6 強)に近いレベルの強さであったと推察される^(註)。被害(無被害を含む)との相関による設計裕度の検証が望まれる。

(注)：短周期地震動の周期特性は、震源過程(断層のどこがどのように壊れるかを言う)、

伝播経路、直下の地盤特性によって決定される。近隣でも地盤特性が異なれば周期特性は違ったものになる。

教訓 4 東北地方太平洋沖地震の短周期地震動の特徴

東北地方太平洋沖地震は、観測点によっては大きな最大加速度が記録されているが、それらは短周期の成分（例えば、0.1-0.3 秒）が卓越した地域のものであって、建物の倒壊との相関が強いと云われる。1-2 秒の周期成分が卓越している地域の最大加速度はそれほど大きくはない。このことは実際の被害状況と整合する。

気象庁・気象研究所の震源過程解析によれば、破壊開始点を気象庁の一元化震源（北緯 38.104 度、東経 142.861 度、深さ 23.7km）として、①すべりの大きな領域は、破壊開始点の東から北東側（震源よりも浅い部分）にあり、最大すべり量は 38m、②主な断層の長さは約 450km、幅は約 150km で、Mw は 9.0、③断層の破壊は、破壊開始点付近で徐々に拡大した後（0～60 秒）、南北方向に分かれて進行、④破壊継続時間は約 170 秒間、と報告されている⁽¹³⁾。

マグニチュード 9.0 の巨大地震にしては地震動が比較的弱かったのは、破壊伝播速度が遅かったためではないかと云われている。滑りの大きな領域が陸地から遠く、ここで発生した強い地震動が減衰していたとも考えられる。南海スラブの震源域は陸地に近く、東海・東南海・南海地震の地震動も同じレベルとってはならない。

3.2 長周期地震動による設備の被害からの教訓

被害状況

仙台、鹿島の他、震源から離れた市原、川崎、新潟、新発田、酒田で、液面揺動による石油タンクの被害がみられた⁽⁷⁾。長周期地震動^(注)によって励振されたものである。液面揺動の振幅はそれほど大きくはなく、最大で 2m 程度であった。

(注)：長周期地震動は、震源が浅くて規模の大きな地震で発生し、減衰が小さくて遠くまで伝わり、平野(堆積盆地)では厚い堆積層で増幅して表面波が形成され、揺れは長時間続くという特徴を有する。

教訓 1 東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の特徴

東北地方太平洋沖地震の長周期地震動は、大規模な海溝型地震にしては、それほど強いものではなかった。その一因として、日本海溝には付加体^(注)が形成されていないことがあげられている。南海トラフには付加体が形成されており、東海・東南海・南海地震の長周期地震動は東北地方太平洋沖地震の数倍の強さになるとの解析結果も報告されている。東北地方太平洋沖地震をもって東海・東南海・南海地震の長周期地震動も同じレベルとってはならない。

(注)：海洋プレートが陸側プレートの下に潜り込むときに表面の堆積物が剥がれ、陸側プレートに付加されてできる地層のことをいう。海洋プレートに沿って付加体が形成されていると、長周期地震動はそこで増幅されてから岩盤を伝わると言われている。

3.3 液状化／地盤変状による設備の被害からの教訓

被害状況

東京湾沿岸のコンビナートでは、震度 5 弱で液状化が起き、地盤変状^(注)を生じた。また、鹿島コンビナートでは、震度 5 強(余震は 6 弱)で防油堤は大きく沈下し、配管トレンチは浮き上がった。

(注)：液状化に伴う地盤の沈下、水平移動及び地盤定数の低下のことをいう。液状化が起きると構造物の地中部に浮力が働き、軽いものは浮き上がり、重いものは沈み込む。基礎などが沈み込むのをめり込み沈下という。

教訓 1 液状化への地震動の継続時間の影響

地震動の継続時間が長かったり、大きな余震が続いたりすると、比較的低い震度で液状化、地盤変状、めり込み沈下が進行する。海溝型地震では、液状化の評価、地盤変状量の推算において、このことの考慮が必要。

教訓 2 防油堤の液状化対策

防油堤が大きく沈下し、機能を喪失した。防油堤の沈下、目地部開口が複数個所にわたると、短時間での応急措置は困難となる。地震の影響下において防油堤の機能^(注)を維持できる構造を採用することが必要。このことは防液堤も同じ。

(注)：貯槽の内容液が流出した場合において流出油を堤内にとどめ、広域に流出、拡散するのを防ぐ。

教訓 3 東北地方太平洋沖地震の液状化の特徴

仙台のコンビナートは陸地を開発して造成されたものであり、強い地震動の影響を受けたにもかかわらず、液状化はほとんど起きていない。鹿島コンビナートも陸地を開発したものであって、池、水田の埋立地などに限定して液状化が起きている。一方、東京湾沿岸、東海から九州にかけての太平洋沿岸、及び瀬戸内海沿岸のコンビナートは、ほとんどが海の埋立地である。東海・東南海・南海地震は地震動が強く、継続時間も長く、大規模な液状化が多く、コンビナートで一斉に起きることが予想される。地域によっては、兵庫県南部地震の神戸市東灘区（以下、東灘区という）のコンビナートにおけるものに匹敵する規模のものとなり、余震によってさらに進展することも考えられる。

3.4 津波による設備の被害からの教訓

津波のエネルギー、破壊力は波高、速度、形態（射流か常流か）によって異なり、設備の耐津波設計、津波対策は段階的に考える必要がある。各方面で検討されていることであり、ここでは、報告書の事例の範囲で得られた教訓について述べる。

教訓 1 津波による主な設備の損傷モード

耐津波設計では、津波の影響によってどこがどのように壊れるか、津波による損傷モードを知ることが大切なこととなる。仙台コンビナートと鹿島コンビナートの事例^{(2),(5),(7)}から、実際にどのような影響を受けたか、その大略（全てではない）を表 1 に示す。詳細については、ここではふれない。

表1 津波の影響の種類と影響を受ける主な設備

津波の影響	津波の影響を受ける主な設備								
	栈橋・ローディングアーム	岸壁・護岸	海水ポンプ・ポンプ室	防油堤・防液堤	危険物タンク	ヤード配管	電気設備	計装設備	タンクローリー
波力	○	○ ⁽¹⁾	○	○	○	○	○	○	○
浮力					○ ⁽²⁾	○			○
洗掘・浸食		○ ⁽¹⁾		○ ⁽¹⁾	○ ⁽¹⁾ (盛土基礎)	○ ⁽¹⁾ (ローカル基礎)			
漂流物衝突	○ ⁽³⁾				○	○	○	○	
冠水			○				○ ⁽⁴⁾	○ ⁽⁵⁾	

(1): 地盤変状で被覆がはがれたり、地面が荒れたりすると、洗掘、浸食による被害を受けやすくなる。

(2): 浮き上がると波力によって移動する。

(3): 漂流大型船舶の衝突 (4): 短絡、地絡、絶縁不良など (5): 目詰まり、基板腐食など

教訓 2 地盤変状と津波の重畳による被害拡大の防止

岸壁・護岸、防油堤・防液堤、危険物タンク(盛土基礎)などは、地盤変状によって被覆がはがれたり地盤が荒れたりすると、洗掘、浸食の被害を受けやすくなる。土木構造物の被覆工、地盤変状対策は、津波の影響軽減のためにも大切。

教訓 3 海水ポンプの耐津波信頼性の確保

海水ポンプは揚程の関係で一般に護岸沿いに置かれ、護岸が高い場合は一段下げて置かれ、津波の影響を受けやすい。ディーゼルエンジン駆動などの海水ポンプは、交流電源を喪失した状況で大規模火災が発生したときに防消火の要となるものであり、耐津波信頼性の確保が必要となる。予想される波高に応じ、ポンプ室浸水防止、燃料補給ポンプの防護、移動式海水ポンプの配備などの対策が考えられよう。海水ポンプは耐震信頼性の確保も大切であり、これについては4.3で述べる。

教訓 4 波高の高い射流に対する耐津波設計・津波対策

久慈国家石油備蓄基地の陸上設備及び福島原子力発電所の海水ポンプ設備は壊滅的な被害を受けた。波高が高く(地盤からの高さ8-9m)、射流の直撃を受けた可能性もある。津波が護岸に衝突して上方に向きを変え、落下時に斜め上空から直撃したことも考えられる。地形によってはこうした津波が予想され、波力、耐津波性の評価方法に加え、レイアウト、エネルギー軽減策(例えば背が高く堅牢な防油堤、防液堤など)などを考えることも必要と思われる。

4. 兵庫県南部地震による被害からの教訓

平成7年1月17日に淡路島北部を震源とするM7.3の地震が発生した。神戸市を中心とする阪神地域および淡路島北部が甚大な被害を受け、東灘区のコンビナートも被害を受けた。この地震による被害から得られた教訓について述べる。

4.1 平底円筒形貯槽受払配管のLPG漏出事故からの教訓

東灘区のコンビナート一帯で液状化が起き、いたるところで噴砂、噴水が見られ、地盤は沈下した。護岸は海側に数mせり出し、背後の地盤は海側に移動し、沈下も生じた。護岸の移動に伴う地盤の沈下、移動は護岸に近いほど大きく、護岸沿いの地盤面は海側に傾斜した。この地盤変状の影響により、平底円筒形貯槽の受払配管の元弁フランジからLPGが漏出した。報告書⁽¹⁴⁾を基に、地震発生から危険を回避するまでの過程を流れ図にして図7に示す。

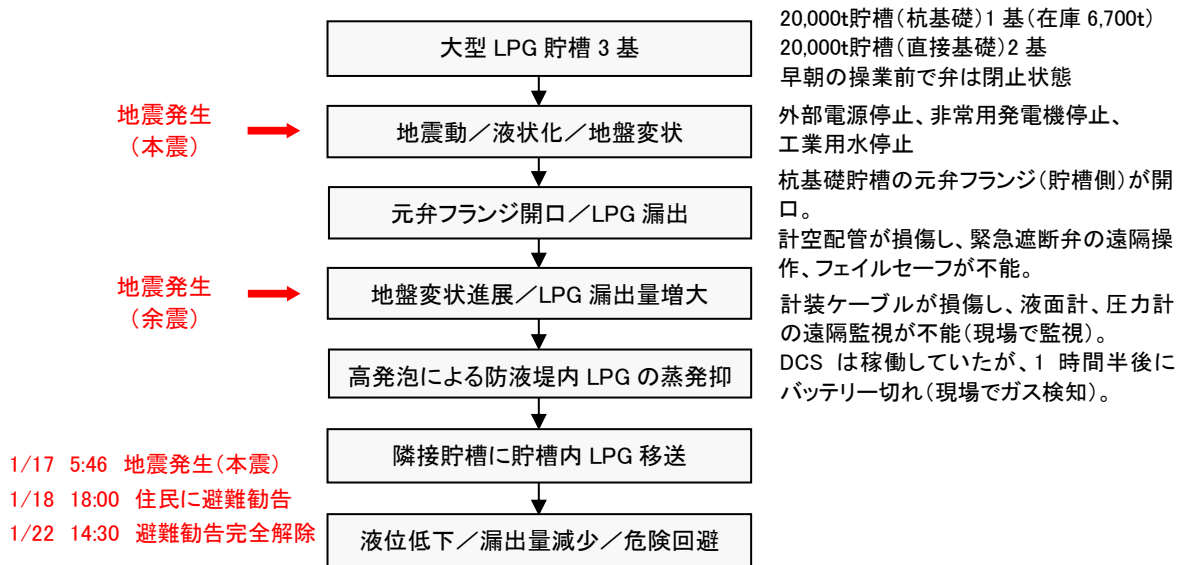


図7 地盤変状によるLPG貯槽元弁フランジ開口とLPG漏出

漏出の原因と状況

LPG漏出事故は杭基礎の平底円筒形貯槽の緊急遮断弁周り受払配管で起きた。貯槽が杭基礎で緊急遮断弁を吊っていた架台が直接基礎であったため、地盤変状を生じたときに架台の基礎が沈下して梁がハンガー、緊急遮断弁を押さえつけ、配管に過大な曲げモーメント、せん断力が生じ、地盤の水平移動の影響で軸力も加わり、貯槽の元弁フランジが開いてLPGが漏出した。

なお、地震発生時は緊急遮断弁、元弁ともに閉じていた。地震の影響で計装配管が損傷しており、開状態であった場合には、遠隔操作が不能で、フェイルセーフ(空気溜めの空気を利用)も機能しない状況にあった。また、地震で計器室と現場計器間の計装ケーブルが損傷したため、貯槽の液面計、圧力計の遠隔監視が不能となり、現場で監視を続けた。

教訓1 貯槽内容物の受払配管からの流出防止の基本的考え方の理解

貯槽内容物の受払配管からの流出を防止するには、①緊急遮断弁が確実に閉じる、②貯槽ノズルと緊急遮断弁の間で配管が損傷しない、の2つの条件を同時に満足することが必要。損傷個所が緊急遮断弁と元弁の間であっても、漏洩量が多いと元弁に接近するのが困難になり、危険も伴う。

教訓 2 貯槽受払配管の地盤変状に対する設計思想

貯槽の受払配管は、緊急遮断弁を越えた位置（貯槽と反対側）で貯槽と共通基礎の支持架台に固定するなど、地盤変状の影響を排除、軽減する設計思想、構造計画が必要。

教訓 3 緊急遮断弁周り計装配管の地盤変状に対する設計思想

空気溜の空気をフェイルセーフの動力源とする緊急遮断弁は、地盤変状の恐れがある場合、空気溜を貯槽と同一基礎にするなど、地盤変状の影響を排除、軽減する設計思想、構造計画が必要。

教訓 4 状態量監視システムの耐震信頼性の確保

状態量の遠隔監視システムの機能喪失が重大な事態を招く恐れがある場合には、当該システムの大地震に対する耐震信頼性の確保が必要。計装ケーブル断線の事態を想定しておくことも必要。

教訓 5 最大仮想事故の規模に応じた耐震性、耐震信頼性の確保

地震が発生したのは1月の早朝で、六甲おろしの陸風が吹き、入荷前で液位が低い時であった。真夏の日中、海風が吹き、入荷後で3基ともに液位が高かったら、状況は変わっていたかもしれない。防災計画では最大仮想事故（現実に起こり得る最大の事故災害）を把握、認識し、リスクの大きさに応じて耐震性、耐震信頼性を高め、リスクを軽減することが必要。

4.2 平底円筒形貯水槽の象の脚座屈からの教訓

神戸市内で平底円筒形貯水槽3基が象の脚座屈を起こし、側板下部に亀裂を生じて工水が全量流出した⁽¹⁵⁾。設計震度は0.2で、高さと直径の比(H/D)が比較的大きく(1.1-1.3)、満水状態にあった。設計震度が0.3で設計された危険物タンクで、H/Dが比較的大きく、ほぼ満液状態であったものの中にも、亀裂の発生には至らなかったが、象の脚座屈を起こしたものがあつた。

亀裂発生の原因

平底円筒形貯水槽の象の脚座屈は、荷重-変形曲線が劣化型で、座屈耐力に達してからの塑性変形によるエネルギー吸収能力に乏しい。亀裂の発生は、設計震度0.2で設計された平底円筒形貯水槽について、象の脚座屈の裕度の限界に達したことを意味する。

教訓 1 平底円筒形貯水槽の象の脚座屈の防止

設計震度0.2で設計された平底円筒形貯水槽は、大地震に際し、側板最下部に亀裂を生じて工水が全量流出する可能性が高い。平底円筒形貯水槽は、使用用途に応じ、設計震度を高めることが望ましい。既設のものについては液位を下げるのも1つの方法。

教訓 2 高圧ガス平底貯槽、危険物タンクの象の脚座屈の防止

高圧ガスの平底円筒形貯槽及び危険物タンク(平底円筒形貯槽)は、以前は設計震度0.3で設計されていた。基準が制定されてからは動的な応答が考慮されるようになり、既設のもので裕度に乏しい貯槽は最高液位の調整が行われた。兵庫県南部地震以後、

大地震に対する漏洩防止に耐震設計の主眼が移ってきており、貯槽の重要性、危険性に応じ、象の脚座屈の損傷モードについて、大地震に対する余裕を再度確認しておくことが望ましい。

4.3 防消火設備の地盤変状による被害からの教訓

防消火設備の被害

防消火設備の被害には、前述の地震動による工水タンクの被害に加え、液状化、地盤変状によるものとして、海水ポンプの送水不能、コンクリート製貯水槽の亀裂発生と用水流出、消防車庫シャッターゆがみによる出動障害などがあった⁽¹⁶⁾。

教訓 1 防消火設備の耐震信頼性の確保

防消火設備（システムを成している）を構成する幾つかの設備が地震で損壊し、火災が発生した場合において初期消火が困難な状況にあった。防消火設備は、意図するところに従い、サブシステム・システム構成要素の耐震信頼性・耐震性の確保が必要。

教訓 2 海水ポンプ設備の耐震信頼性の確保

ディーゼル駆動海水ポンプの吸入配管が地盤変状で損傷し、ポンプが停止した。ポンプ室から出る吸入・吐出配管は地盤変状の影響を受けやすく、影響を排除、軽減するための配慮が必要。また、損傷した場合の応急措置の方法を考えておくことが望ましい。このことは、ディーゼルエンジン（又はガスタービン）の燃料配管、冷却水配管（冷却式の場合）についても同様。

4.4 盛土基礎の危険物タンクの地盤変状対策

東灘区のコンビナートでは、盛土基礎の危険物タンクがめり込み沈下や不等沈下を起こした。護岸近くでは地盤の水平移動の影響も受けた。既設の大型タンク（特定屋外貯蔵タンク）の液状化対策は進められていたが、小型のタンク（準特定屋外貯蔵タンク）についても行われることになった。

5. その他の地震による被害からの教訓

地震によるコンビナートの災害として忘れてはならないものに、新潟地震におけるタンク火災、広域火災がある。このときに得られた多くの教訓が現在のコンビナートの地震防災に生きている。また、計器の誤作動、誤認による事故事例として、千葉県東方沖地震における除害設備の機能喪失がある。教訓が得られた事例は他にもあるが、ここでは特にこの2つを取り上げることとする。

5.1 新潟地震のタンク火災からの教訓

1964年6月16日に新潟県沖を震源にマグニチュード7.5の新潟地震が発生した。同地震では、液面揺動が関係する大型タンクの火災（第一火災）と、液状化と津波が関係する広域火災（第二火災）が発生した。報告書等^{(17),(18)}を基に、第一火災については液面揺動から鎮火までを、第二火災については液状化から鎮火までを、それぞれ流れ図にして図8、図9に示す。

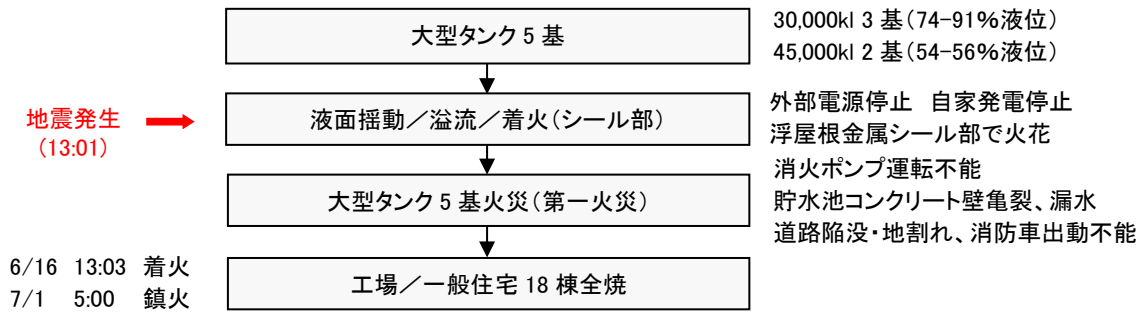


図8 液面揺動による大型石油タンク火災(第1火災)

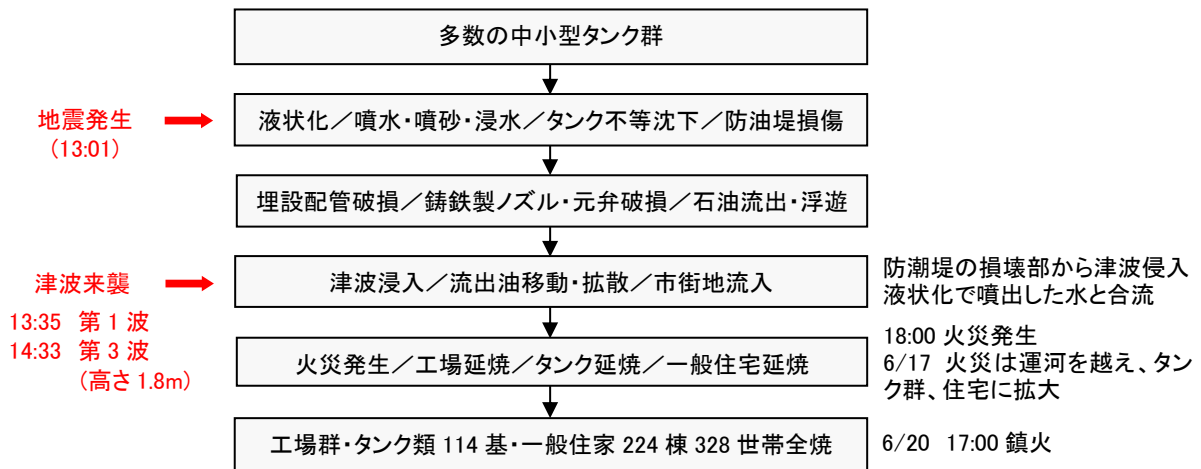


図9 液状化による石油配管損傷と津波の相乗による広域火災(第二火災)

第一火災の原因と状況

地震が発生して大型原油タンク 5 基が液面揺動を起こし、液位の高かったタンクから原油が溢流し、防油堤内に溜まった。揺動を繰り返すうちにタンク 1 基から発火し、防油堤内の原油が炎上し、次々に他の 4 基に延焼し、大火災となった。45,000kl タンク 2 基の側板が内側に倒れ、火の付いた油が溢れ、防油堤を倒して堤外に流出し、工場の一部と近くの民家が延焼した。着火の原因は浮屋根の金属シールが側板との摩擦、衝突で火花を出したためと推定されている。

第二火災の原因と状況

地震によって液状化が起き、構内一帯で地下水が噴き出し、地盤は沈下し、冠水した。地盤変状によって防油堤は損壊し、タンクは不等沈下を起こした。埋設配管が損傷し、铸铁製のタンクノズル、元弁が割れ、石油が流出し、水の上に浮かんだ。しばらくして津波が来襲し、防潮堤の損壊部から海水が構内に侵入し、地下水と混合した。油を浮かべた海水は広域に拡散、移動し、市街地まで流入した。地震から 5 時間後に工場で火災が発生し、火は水面の油に移り、隣接工場、タンク群、市街地へと延焼し、広域火災となった。

教訓 1 液面揺動、液状化の設計への反映

被災したプラントの復旧に当たり、タンク液面の上部空間の確保、タンク基礎地盤の改良、浮屋根ソフトシールの採用、可撓管の採用、埋設配管の制限、鋳鉄製ノズル・元弁の不採用、防消火配管の地上化、鉄筋コンクリート製防油堤の採用、柱脚の耐火被覆、流出油防止堤の築造、送水ポンプと駆動部の共通基礎化、散水設備の設置などの対策がとりいれられた。これらの多くが法規に規定され、現在も生きている。

教訓 2 津波の前の大規模な漏洩事故の回避

第二火災では、津波が損壊した防潮堤から侵入し、流出油が海水に浮かんで移動、拡散し、広域火災の原因の1つとなった。津波が生じても広域火災が生じないようにするには、津波の前に大量漏洩を起こさないようにすることが必要。

5.2 千葉県東方沖地震における排ガス除害設備機能喪失の事例からの教訓

1987年12月17日に九十九里浜付近を震源にマグニチュード6.7の千葉県東方沖地震が発生した。この地震により、千葉のコンビナートで、石油化学プラントの排ガス除害設備が、僅かな時間ながら機能を喪失した。事故事例集⁽¹⁹⁾を基に、誤作動から危険回避までの流れを図10に示す。

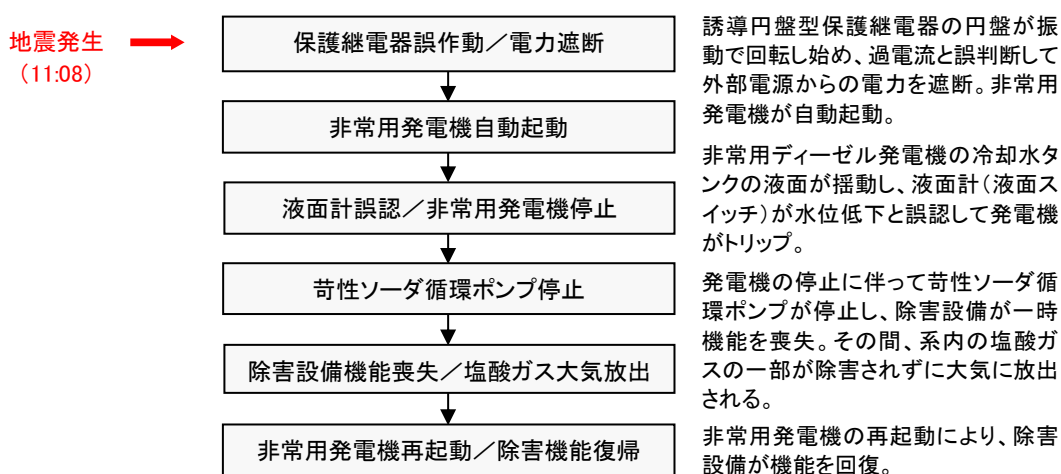


図10 計器の誤作動、誤認による除害設備の機能停止

教訓 1 除害設備の耐震信頼性の確保

保護継電器の誤作動と液面計の誤認によって、非常用発電機を再起動するまでの時間、除害設備が運転を停止した。実際に外部電力が停止し、非常用発電機も停止すれば、同様な事態となる。有毒性ガスを無害化して大気に放出する除害システムは、大地震に対する耐震信頼性の確保が必要。

教訓 2 保安システムの継電器・計器の選定

プラントの安全な運転停止などの保安システムに使用される継電器、計器にあって、それが誤作動、誤認した場合にプラントの安全を脅かす恐れがある場合には、当該計器は振動、液面揺動によって誤作動、誤認しないものを選定することが必要。

6. 東海・東南海・南海地震への備え

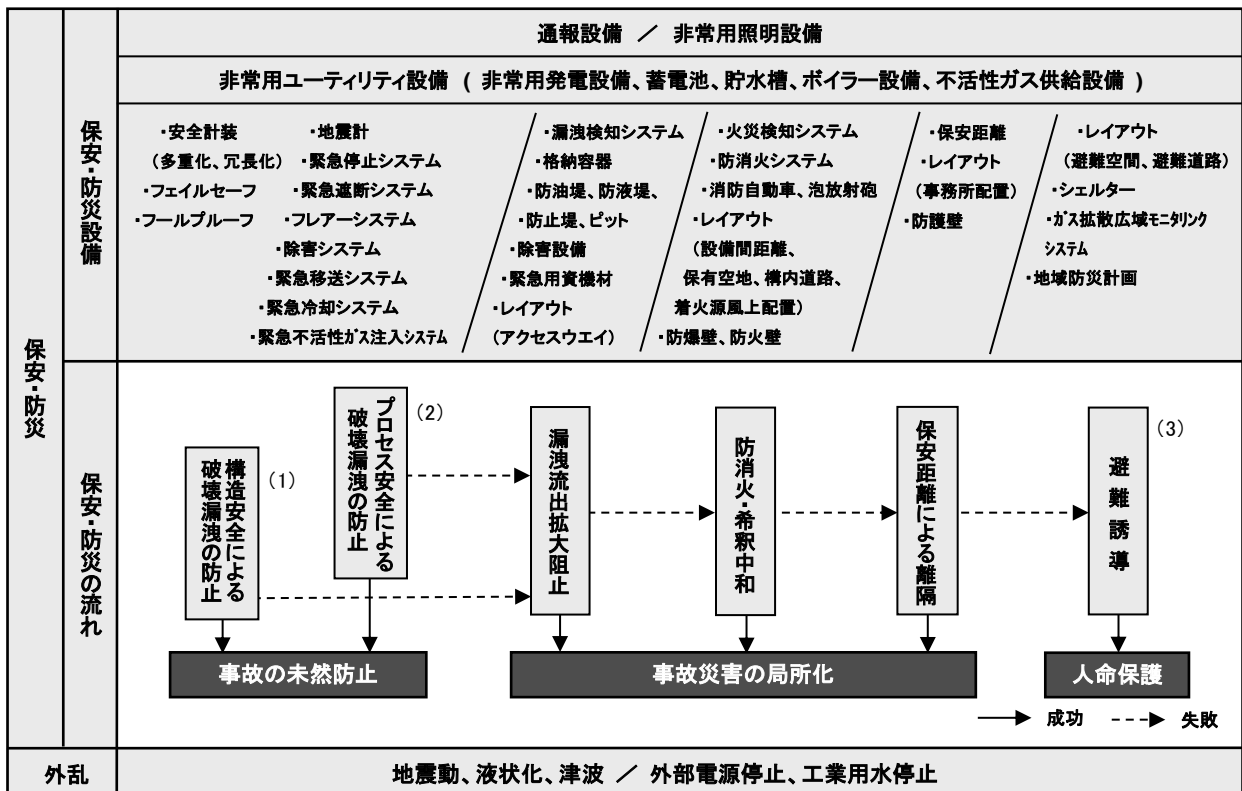
6.1 保安・防災の流れと事故災害の防止

図11は、地震時の外乱の中で、プラントの保安・防災がどのように進められて行くのか、その概略の流れを示したものである⁽²⁰⁾。東海・東南海・南海地震に備えるには、外乱の地震動、液状化、津波として、相応規模のものを想定することになる。

流れ自体は、平時の場合も地震時の場合も基本的には変わらない。根本的に異なるのは、地震時には保安設備・防災設備も同時に地震の影響を受けており、そうした影響下において保安防災活動を進めていかなければならない点にある。

大地震に際して事故を未然に防止するには、危険物等を保有する設備の破壊を防止するとともに、プラントを安全に停止することが必要となる。そのためには、高圧ガス設備、危険物施設等について大地震に対する耐震性を確保するとともに、保安設備について大地震に対する耐震信頼性を確保することが必要となる。又、事故を生じた場合において事故災害の局所化（局限化ともいう）を図るには、防災設備についても大地震に対する耐震信頼性を確保することが必要となる。

大津波の場合には、地震の場合とは違って人は避難しており、避難指示が解除されるまでは人の手による保安・防災活動はできない。大津波に際して災害を防ぐには、大津波の前に大規模な漏洩事故を起こさないようにし、また、大津波の影響を受けて



- (1): 構造物が地震によって破壊されることなく、内容物の漏洩がない。
- (2): 地震時及び地震後において、構造物の破壊に至るような温度、圧力の上昇がなく、かつ、適切な処置がされないままに内容物が外部に放出されてしまうようなことがない。
- (3): 従業員の避難誘導と地域住民の避難誘導の2局面がある。

図11 地震時におけるプラントの保安・防災の流れ

も大規模な漏洩事故を起こさないようにすることが必要となる。前者は耐震設計、後者は耐津波設計によることとなる。

6.2 耐震性・耐震信頼性確保の手段

ここでは、耐震性・耐震信頼性の確保の手段としての耐震診断と耐震性改善について、その概念を述べる。耐津波性、耐津波信頼性の確保も、基本的には同じである。

既設プラントの諸設備の耐震診断は、目視で可能な範囲で、地震時の挙動を想像しながら効率的、効果的に審査を進め、必要と判断された場合には定量的な評価を行う。診断の対象は、高圧ガス設備、危険物施設等の他、保安・防災に係る電気設備、計装設備、非常用(保安用)用役設備、通報設備、非常用照明設備などが優先される。弱小構造物は周辺構造物との干渉の影響も評価する。歩きながら審査することから、欧米ではウォークダウンまたは耐震ウォークダウンと呼んでいる。

防災体制の診断では、現場を見て周り、その場で地震被害状況を推測し、事故が起きた場合の地震災害のシナリオ(ET)を想定し、設備の損傷し易さと災害への進展し易さから、地震災害のリスクを感覚的に評価する。必要と判断された場合には定量的評価を行う。リスクが大きいようであれば、構造の弱点や防災体制の不備を改善し、リスクを軽減することを考える。



図12 ウォークダウンによる診断と改善案作成

地震時挙動の想像では過去の地震被害と損傷モードを思い浮かべ、地震災害シナリオの想定では過去の地震災害・事故災害と災害拡大要因を思い浮かべる。ウォークダウンを仕組みとして発展させるには、データの蓄積・整備、教材の作成、研修など、組織的な対応、取り組みが必要となる。

7. おわりに

エネルギー保有量の大きなプラントが最大仮想事故を起こしたら、また、多くの産業にエネルギー、ユーティリティ、基礎製品を供給するプラントが広域にわたって同時に生産機能を喪失したら、社会・経済への影響は計り知れない。東海・東南海・南海地震が発生した場合において、大規模な事故災害を未然に防止し、また、生産機能への影響を最小限に抑えることは、企業の存続のみならず、国力維持のためにも大切なこととなる。このことは、東北地方太平洋沖地震で得られた最も大きな教訓のように思われる。

プラントの地震被害・地震災害を防止、軽減するには、実際の被害経験から得られた教訓を生かすことが大切である。地震被害・地震災害のデータを蓄積し、それらを分析し、手段、手法を考え、次代に伝えていくことは、地震国の日本にあって、現代に生きる我々の責務のように感じる。

最後に、東北地方太平洋沖地震で被災され、その経験を公開された事業所、及び事業所の皆様に心から敬意を表します。また、防災活動で負傷された方や体調を崩された方にお見舞いを申し上げるとともに、亡くなられた方に謹んで哀悼の意を表します。

参考文献

- (1) コスモ石油株式会社千葉製油所、東日本大震災時のLPGタンク火災・爆発事故における防災活動について、*Safety & Tomorrow*、No.143、2012.5
- (2) 羽尾 務、東日本大震災における被害と震災時の対応状況、2012 化学工学会 第44回秋季大会 S-47、2012.9
- (3) 三島信行、東日本大震災『鹿島事業所被害プラント安全停止と再稼働』、SICE 産業応用部門 2012 年度大会 産業システムシンポジウム
- (4) 安全工学会地震被害調査委員会、株式会社クレハ いわき事業所 地震被害調査報告（一般公表報告書）
- (5) 山口健志、東日本大震災における仙台製油所の防災活動について、*Safety & Tomorrow* No.144、2012.7
- (6) 吉田久雄・大藤友詳、東日本大震災における久慈国家石油備蓄基地の防災活動について、*Safety & Tomorrow* No.143、2012.5
- (7) 消防庁 消防研究センター、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書（第1報）、平成23年12月
- (8) 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
- (9) 日本電設工業協会 技術・安全委員会、東日本大震災電気設備被害調査報告書、2012.2
- (10) 稲葉 忠、過去の地震被害から学ぶ配管系の耐震設計、配管技術、Vol.47 No11、2005
- (11) 源栄正人、東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓、東日本大震災に関する技術講演会論文集－巨大地震・巨大津波がもたらした被害と教訓、2012.2

- (12) 例えば、国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による K-NET 観測記録の応答スペクトル、平成23年3月23日
 - (13) 気象庁・気象研究所「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定 ― 近地強震波形を用いた解析 ―、(2012/10/15更新)
 - (14) 高圧ガス保安協会、兵庫県南部地震に伴う LP ガス貯蔵設備 ガス漏洩調査中間報告書、平成 7 年 5 月
 - (15) 自治省消防庁消防研究所、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
 - (16) 消防研究所、兵庫県南部地震による危険物施設の地震被害調査報告書、平成 7 年 5 月
 - (17) 白崎正彦、新潟地震から25年―その 1―、同一その 2―、高圧ガス、Vol.29 No.8, 9、1989.8, 9
 - (18) 岩淵洋子・今村文彦・越村俊一、1964年新潟地震津波にみる港湾域での複合災害の実態と今後の課題、海岸工学論文集、第53巻、pp.1326-1330、2006
 - (19) 高圧ガス保安協会、石油精製及び石油化学装置事故事例集 (1995)
 - (20) 稲葉 忠、化学産業における地震災害のリスクマネジメント、化学工学、 第 60 巻 第 7 号、1996
 - (21) 高圧ガス保安協会、コンビナート保安・防災技術指針 -化学工場における地震対策-、1974.9
- 注：参考文献 (21) は本文中では引用していないが、コンビナートの保安・防災の基本書として掲げた。