

化学産業における地震災害のリスクマネジメント

東洋エンジニアリング(株)

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*

稲 葉 忠

1. はじめに

化学プラントでは、多種多様な化学物質を大量に保有し、扱っている。化学プラントが地震に襲われ、化学物質が漏洩流出したりするようなことになれば、爆発、火災、中毒事故、あるいは環境破壊などの災害を招くことが、可能性として考えられる。

これらの災害が発生した場合に企業が受ける損失には、人的、動的資産の損失、および生産停止による損失が考えられ、被害が第三者に及べば、賠償責任による損失がこれらに加わる。社会的信用を失えば、人材確保やパブリックアクセプタンスも困難となり、長期にわたって経営を苦しめることになる。化学産業においては、地震災害のリスクマネジメントが、経営の重要課題の一つとなってくる。

本稿では、始めに地震災害のリスクマネジメントについて一般論を述べ、次に破壊的地震に対する防災計画の基本的な考え方と耐震設計との関連について述べ、最後に、高圧ガス設備の耐震設計の現状についてふれることとしたい。



Makoto Inaba
昭和44年 慶廣義塾大学工学部機械工学科卒業
同 年 東洋エンジニアリング(株) 入社
現 在 技術研究所応用技術部長
趣味: 謡曲(最近練習していないので読経に近い)、重量挙げ(20年振りに再開して2年。昔は国体、全日本選手)、砲丸投げ(全日本マスターズを狙いフォームを改造中。力学の最適化問題として扱っている。)

* 1996年4月16日受理

2. 地震災害のリスクマネジメント

2.1 地震災害のリスクマネジメント

(1) 地震災害のリスクの評価と軽減

企業が新たに事業を始めようとする時、経営に影響を及ぼす新たなリスクが生じてくる。このリスクを予測し、少ない投資で大きな効果が得られるような対処の方法を考え、実行に移すことを、一般にリスクマネジメントと呼んでいる。

地震災害のリスクは、起こりうる地震災害を想定し、損失額を見積るとともに、災害の発生確率を推算し、両者を掛け合わせるによって評価される。

また、地震災害のリスクへの対処の方法としては、設備の損傷頻度を低減するとともに、地震災害による損失を低減し、リスクを軽減することを考える。具体的には、事故の未然防止と災害の局限化であり、防災計画を立てる中で考えていくことになる。

リスクの軽減のため、工場を地方に分散したり、保有エネルギー量を制限したり、代替プロセスを採用したり、あるいは活断層、人口密集地、文化財から離れた場所を立地を選んだりしたとしても、それぞれの環境において、防災計画を立てることは必要となる。

(2) 設計地震動の決定

防災計画を立てるとき、耐震設計用にどんな大きさの地震動(大きさのほか、周期特性などの意味も含む)を想定するかが問題となる。小さな地震動を想定してはリスクは軽減されないし、あまりに大きな地震動を想定してはコストが高み、経営が成り立たなくなる。耐震設計への投資額と残されたりリスクとの和が最小となるような大きさの地震動が、企業にとって最適な設計用の地震動だということができよう。しかし、地震災害のり

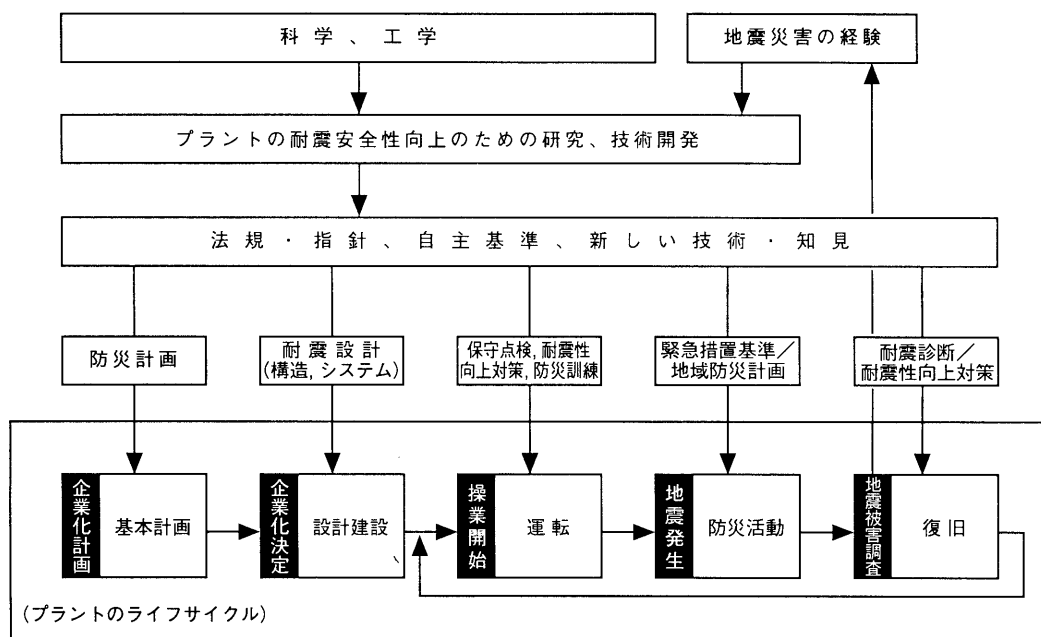


図1 プラントのライフサイクルと耐震安全性の向上

スクを定量的に評価しようとする時、シミュレーションの範囲が自然科学の領域から社会科学の領域にまで広がり、多くの困難に直面する。

現実的には、実際に起こりうる災害の規模を認識した上で、企業経営の視点と社会的視点に立ち、どの程度の頻度（大きな地震ほど頻度は小さい）の地震動であったら企業として諦めがつくか、あるいは社会的に許されるかを考え、その大きさを決めることになる。法規、指針に設計地振動の大きさが定められていれば、社会的視点に立ったときの客観的見方として、リスクマネジメントの考え方の中にとり入れていくことになる。

2.2 ライフサイクルとリスクマネジメント

プラントを建設するにあたっては、地震災害のリスクマネジメントとして防災計画を立て、耐震設計を行うことになる。しかし、リスクマネジメントは基本計画から設計建設の段階までで終わるわけではない。プラント周辺の都市化が進んだり、社会の価値観が変わったりしてくれば、地震災害のリスクは大きくなっていく。また、保守点検を怠っていけば、腐蝕などによる劣化によって設備の耐震信頼性は低下し、教育・訓練を怠っていけば、マンマシーンシステムとしての保安防災システムの耐震信頼性も低下していく。これらはともに地震災害のリスクを増大させる因子となる。一

方、プラントの耐震安全性を向上する新しい技術が生まれ、地震災害の経験によって新たな知見が得られれば、少ない投資で地震災害のリスクを効果的に軽減できるようになる。

地震災害のリスクマネジメントは、ライフサイクルに沿って、継続的に実施されていくことが必要であり、そのリスクマネジメントを支援する法規、指針も、社会、経済の変化と技術の進歩とともに、継続的に見直しが行われ、弾力的に運用されていくものとなる（図1）。

3. 防災計画と耐震設計

3.1 地震時の保安防災の流れ

プラントが破壊的地震に襲われると、全設備が激しく振動し、液面は揺動する。また、埋立地などでは液状化により、地盤は変状する。海岸近くでは、津波に襲われることもある。そして、外部からの送電や、工業用水の供給も停止する。こうした外乱、環境の中にあつて、地震時の保安防災がどのように進行していくのか、その概略の流れを図2に示す。同図には関連する設備、システムも流れに対比して示した。なかには、いくつかのステップにまたがって機能するものもある。

地震が発生したら、まずは地震に対する構造安

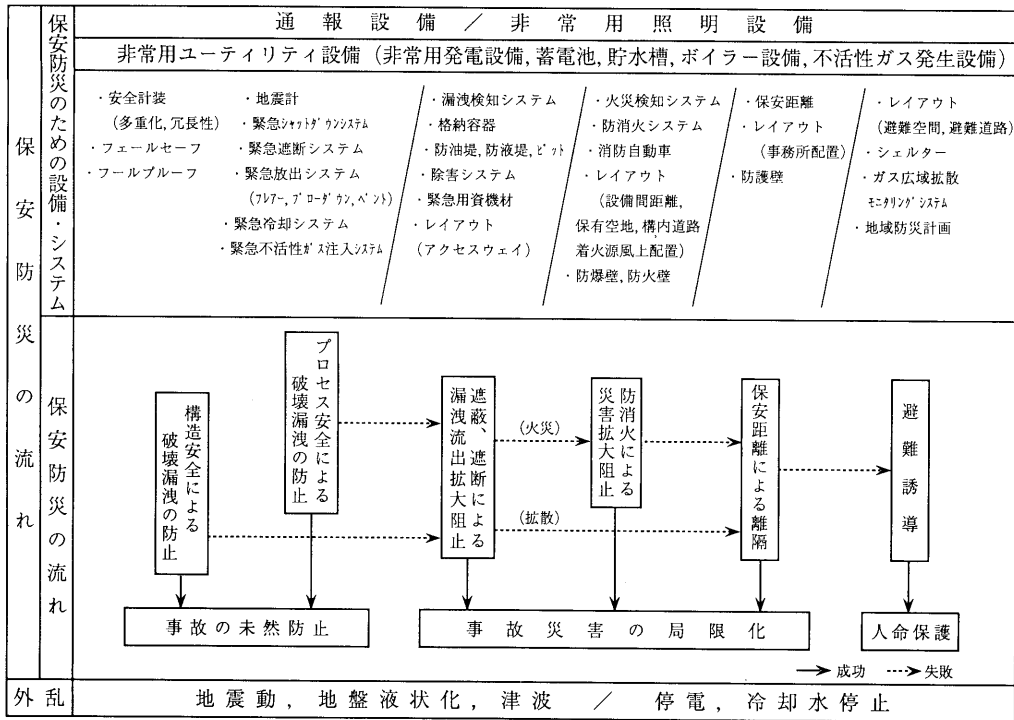


図 2 破壊的地震時の外乱と保安防災の流れ^{1),2)}

全とプロセス安全の機能により, 事故を未然に防止する。ここでいう地震に対する構造安全の機能とは, 構造物が地震によって破壊されることなく, 内容物の漏洩が無いことをいう。また, 同じく地震に対するプロセス安全の機能とは, 地震時および地震後にあって, 構造物の破壊に至るような, プロセス異常に基づく温度, 圧力の異常上昇が無く, かつ, 適切な処置をされないままに, 内容物が外部に放出されてしまうようなことが無いことをいう。

もし, 事故を未然に防止することができず, 内容物が漏洩し始めたら, 遮蔽, 遮断の手段により, 漏洩流出の拡大を阻止する。火災になれば, あるいはその危険性があれば, 消防活動によって災害の拡大を阻止し, 可燃性, 有毒性ガスが大気中に拡散する事態になれば, 居住地区に到達する前に, 保安距離をもって危険限界濃度以下に十分に希釈されることに期待する。保安距離は火災の輻射熱を弱め, また, 爆風圧を減衰させる役割も果たす, そして, 危険が人命に及ぶと判断されたら, 速やかに避難誘導に移る。

漏洩する化学物質がガスか液体か, あるいは可

燃性か有毒性かによって具体的手段は変わってこようし, 事故が同時に多発すれば流れは輻湊してこようが, 保安防災の概略の流れは基本的にはこのようなものとなる。

保安防災の流れ自体は, 地震による事故の場合も平時の事故の場合もそう大きくは変わらない。しかし, 根本的に異なるのは, 図 2 の上段に示すような, 保安防災のための設備, システム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, 一連の保安防災活動を進めていかなければならない点にある。

3.2 保安防災システムの耐震信頼性

(1) 保安防災システム

保安防災には一つの流れがあり, その流れは人の判断によってコントロールされる。また, 保安防災のための多くの設備, システムは, 必要なユーティリティが供給され, 人の判断, 操作が入ることによって, 初めて機能する。保安防災全体のシステムは, 一つの大きなマンマシーンシステムとして, 図 3 のように表されよう。

(2) 信頼性ブロック図

構造物, システムの地震に対する信頼性は, 耐

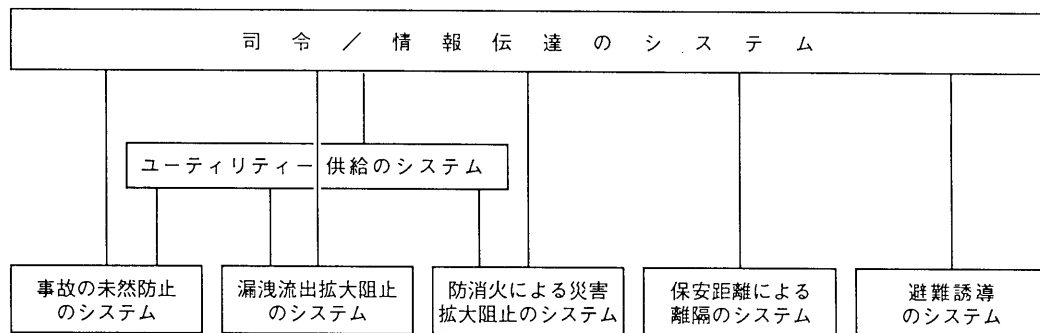


図 3 プラントの保安防災システム²⁾

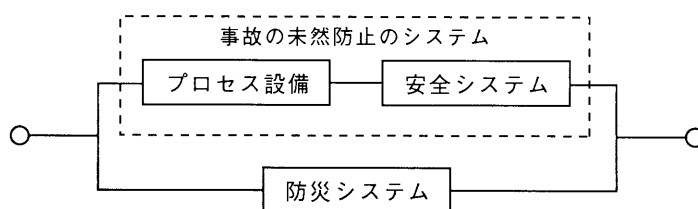


図 4 保安防災システムの耐震信頼性ブロック図²⁾

震信頼性の信頼度（以下、単に信頼度という）の尺度をもって表せる。信頼度 1 といえ、ある大きさの地震が来たときに、破壊したり機能を喪失したりする確率は 0% であることを意味し、信頼度 0 といえ、同じくその確率は 100% であることを意味する。

いま、事故の未然防止のシステムのうち、構造安全による破壊漏洩防止の機能を負う設備をプロセス設備、そして、プロセス安全による破壊漏洩防止の機能を果たすシステムを安全システムと呼ぶ。また、漏洩流出拡大阻止から避難誘導までの四つのサブシステムをまとめて防災システムと呼び、その機能は、事故が起きた後、最終的に従業員および地域住民の生命の安全を守ることにあるものとする。保安防災の究極の目的は人命の保護にあるとすれば、事故の未然防止のシステムと、この定義による防災システムのうちのいずれか一方が機能を果たせばよい。また、事故の未然防止のシステムが機能を果たすには、プロセス設備が破壊されることなく、かつ、安全システムが機能を果たさなければならない。

ここで、図 3 において司令／情報伝達のシステムとユーティリティ供給のシステムの信頼度は十分に高いものとする、保安防災システムの耐震信頼性のブロック図は、図 4 のように表すこ

とができる。

(3) 信頼度の配分

保安防災システムとして、あるレベルの、高い信頼度を確保しようとするとき、プロセス設備、安全システム、防災システムの三者にバランスよく信頼度を配分できる場合には、それらに求めるべき信頼度は、その一段下のレベルのものでよい。しかし、プロセス設備と安全システムのいずれか一方でも信頼度が低い場合には防災システムに、また、防災システムの信頼度が低い場合にはプロセス設備と安全システムの両者に、保安防災システムとして確保しようとするレベルと同等の高い信頼度が求められることになる。

3.3 防災計画と耐震設計

(1) 防災計画

信頼度による説明から判るように、プロセス設備と安全システムを耐震信頼性の高いものとし、さらに耐震信頼性の高い防災システムによってバックアップすることにより、保安防災システムは一段と耐震信頼性の高いものとなる。防災計画は、基本的にこの考え方に沿って立てられることになる。

破壊的地震に襲われたときに、従業員および地域住民の生命の安全を守るためには、防災システムは四つのサブシステムのうちいずれか、あるい

はいくつかの組み合わせによって機能を果たせばよいのであるが、地震災害による損失の低減の観点からは、できるだけ早い段階で事故災害を局限化することが望ましい。したがって、まずは耐震信頼性の高い漏洩流出拡大阻止のシステムを考え、火災に備えては耐震信頼性の高い防消火システムを考えることになる。遮蔽などの手段による漏洩流出拡大阻止が現実的に不可能な場合、一部の拡散を避けられない場合、あるいは高い耐震信頼性を確保することができない場合には、相応の保安距離をもって離隔することが必要となる。第三者の協力を必要とする避難誘導は、時間的猶予のことも考慮に入れたうえで、最後の手段として考えることになる。

耐震信頼性の高い防災システムが実現困難な場合には、事故の未然防止のシステムの、プロセス設備と安全システムに、完全ともいえる耐震信頼性が要求されることになる。

(2) 耐震設計による耐震信頼性の付与

プロセス設備、安全システム、防災システムの耐震信頼性は耐震設計によって付与される。プロセス設備の耐震設計については、高圧ガス設備の場合について次章で説明することとし、ここでは個々の安全システム、防災システムの耐震設計について述べる。

図2の上段に示した個々の安全システム、防災システムは、計測制御系、動力系、非常用ユーティリティ設備、機器・配管系、支持構造系などをサブシステムとして構成されている。それらのサブシステムのうちのいずれかが機能を喪失すれば、安全システム、防災システムも機能を喪失する。また、それらのサブシステムも、より小さなサブシステム、要素から構成されており、それらのうちの一つでも機能を喪失したら、サブシステムも機能を喪失する。つまり、個々の安全システム、防災システムの耐震信頼性は、当該システムの末端にある様々な構成要素の耐震信頼性に依存する。個々の安全システム、防災システムの耐震信頼性を確保するには、これらの構成要素一つ一つについて、耐震設計あるいは実証試験により、耐震信頼性を付与していくことが必要になる。

破壊的地震時及び地震後にあつて、機能維持が求められるシステムについては、こうしたしらみつぶしの耐震設計が必用となる。計測制御系などにおいては、計器の誤動作にも注意を必要とする。

4. 高圧ガス設備の耐震設計の現状

4.1 高圧ガス設備の耐震設計

(1) 弾性設計と弾塑性設計

耐震設計には、弾性範囲の応答を解析し、基本的に塑性変形を許さない弾性設計と、塑性範囲を含めた応答を解析し、限度内の塑性変形を許容する弾塑性設計とがある。

弾性設計では、耐震性の判定方法として、発生する応力が降伏点ベースの許容応力を越えないことを確認する方法がとられるが、こうした判定方法による耐震設計法は一般に許容応力設計法と呼ばれている。また、弾塑性設計では、塑性変形を許容した設計限界状態（終局状態。例えば亀裂発生、倒壊など）を設定したうえで、構造物に入ってくる地震のエネルギーの総量が、塑性変形によるエネルギー吸収能力を越えないことを確認する方法がとられることが多い。このような判定方法による耐震設計法は終局強度設計法と呼ばれている。

昭和56年に制定された通産省告示515号“高圧ガス設備等耐震設計基準”（以下、告示515号という）は、弾性設計の考え方を基本に許容応力設計法を採用しているが、平成2年に神奈川県で制定された“高圧ガス施設等耐震設計基準”は、弾塑性設計の考え方を基本に終局強度設計法を採用している。

終局強度設計法を確立するには、構造物の破壊モード（どこからどのように破壊していくかをいう。構造に応じていくつかのモードが考えられる）を確認し、当該破壊モードにおけるエネルギー吸収能力を把握するための大規模な破壊実験を必要とする。終局強度設計法は、昭和55年改正の建築基準法の二次設計（破壊的地震に対する崩壊、倒壊防止が目的）に採用されているものであるが、高圧ガスに係る塔、貯槽などの構造物についても研究が進み、実用化の段階にきたものといえよう。

(2) 耐震設計の流れと重要度分類

耐震設計の基本的流れを図5に示す。告示515号も、この流れに沿って具体的方法を定めている。

ここで、重要度分類とは、地震によって破壊された場合に予想される災害の規模に応じて、設備をいくつかの重要度クラスにランク分けし、重要度の高いものほど耐震性を高め、地震災害のリスクが大きくなるのを押さえようという考え方である。告示515号では重要度Ia, I, II, IIIの4ク

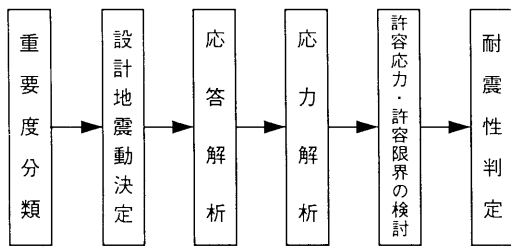


図 5 耐震設計の基本的流れ³⁾

	設 計 法	設 計 地 震 動 (地表面加速度)
第1段階	弾 性 設 計 (許容応力設計法)	告示515号が定める 弾性設計用の地震動 (最大 300 gal)
第2段階	弾 塑 性 設 計 (終局強度設計法)	限界的な地震動 (最大 600~840 gal)

図 6 神奈川県“高圧ガス施設等耐震設計基準”の2段階設計

ラスを設け、Ia と III では設計地震動の大きさに倍の差をつけている。

(3) 二段階設計法

弾性設計が行われていれば、予想を越える大きさの地震に襲われたとしても、そう簡単に破壊するものではない。では、実際にどれだけの大きさの地震動まで破壊されずにすむのか、つまり安全でいられるのかということ、はっきりとしたことは言えない。

そこで神奈川県は、発生 of 切迫性が高い東海地震、南関東地震などの破壊的地震に備え、新しく“高圧ガス施設等耐震設計基準”を制定した。告示 515 号の弾性設計用の地震動に対して許容応力設計法を適用した後、限界的な地震動に対して終局強度設計法を適用し、破壊には至らぬことを確認しようとするものである。限界的な地震動の大きさは、期せずして兵庫県南部地震の激震地区におけるものにはほぼ一致している (図 6)。

4.2 兵庫県南部地震の被害経験の反映

現在、告示 515 号の適用対象は塔、貯槽、およびこれらを支持する架構、基礎までで、配管、計測制御系、防災設備などの耐震設計については、事業所の自主的な判断に任されている。また、地盤の液状化対策も明確にはされていない。

しかし、兵庫県南部地震において、人命に影響を与えるような重大な災害には進展しなかったものの、これらの設備に少なからぬ被害が発生したことから、基準化、指針化に向けた調査検討が進められている。

また、兵庫県南部地震の後に中央防災会議から出された新しい防災基本計画に、「供用期間中に一、二度発生する一般的地震動に対して、機能に重大な支障を生じないこと。発生確率は極めて低いが直下型・巨大海溝型地震による高レベル地震動に対しては生命に重大な影響を与えないこと。」との基本方針が示されたことから、神奈川県におけるような、2段階設計法を採用することについても検討が進められている。

5. おわりに

兵庫県南部地震の後、リスクマネジメントあるいは危機管理 (クライシスマネジメント) という言葉がよく聞かれるようになった。しかし、化学産業の場合には、地震災害のリスクマネジメントにおいて考慮すべき要素は、自然科学から社会科学までの広い領域にわたり、リスクの厳密な評価は極めて難しい。耐震設計も、多くの科学、工学が関係し、一企業が独自に標準を定めることは困難である。このため、合理的な耐震設計法が産官学共同で研究され、基準等にまとめられてきている。これらは社会的視点に立ったときの災害防止を目的としたものであるが、同時に、企業のリスクマネジメントを支援するものでもある。基準の具体的内容に触れることまではできなかったが、地震災害のリスクマネジメントと防災計画との、そして防災計画と耐震設計との、それぞれの関連についてご理解いただけたならば、幸いである。

引用文献、参考文献

- 1) 稲葉 忠：“耐震設計”，INCHEM TOKYO95 化学技術シンポジウム「化学プロセスの安全管理」，(1995, 11, 14)
- 2) 稲葉 忠：“化学プラントの保安防災システムの耐震設計”，日本機械学会 [NO. 900-89] 講習会教材 (1990, 12, 17, 18, 東京, 機械技術者のためのやさしい耐震設計—考え方と新しい展開—) (一部加筆修正し, 高圧ガス 1991, 5, 6, 7 に連載)
- 3) 柴田碧編著：化学プラントの耐震設計, 丸善 (1986, 5)
- 4) 日本機械学会編：耐震設計と構造動力学, 日本工業出版 (1995, 9)
- 5) 高圧ガス保安協会：コンビナート保安・防災技術指針, KHK E007-1974 (1974, 9)
- 6) 通商産業省：高圧ガス設備等耐震設計基準, 通産省告示 515 号 (1981, 10)
- 7) 神奈川県：高圧ガス施設等耐震設計基準 (1990, 6)