

# 化学プラントの運転性能を判断基準とした耐震対策戦略

## Strategy for Seismic Upgrading of Chemical Plant

### Taking Productivity as Criterion of Judgement

○大嶋 昌巳<sup>1</sup>, 加瀬隆<sup>1</sup>, 矢代晴実<sup>2</sup>, 福島誠一郎<sup>3</sup>

Masami OSHIMA<sup>1</sup>, Takashi KASE<sup>1</sup>, Harumi YASHIRO<sup>2</sup> and Sei'ichiro FUKUSHIMA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>千代田アドバンスド・ソリューションズ株式会社 工修

Chiyoda Advanced Solutions Corporation, M. Eng.

<sup>2</sup>東京海上リスクコンサルティング株式会社 博士(工学)

The Tokio Marine Risk Consulting Co. Ltd., Dr. Eng.

<sup>3</sup>東電設計株式会社 博士(工学)

Tokyo Electric Power Services Co. Ltd., Dr. Eng.

Pre-earthquake upgrading and modification of existing chemical plant facilities have been performed by mean of a procedure of the Seismic Design Code and Guidelines of High-pressure Gas Facilities in Japan. Main purpose of this seismic design code is to ensure public safety at seismic events. From the view points of seismic risk of corporate management, CSR (corporate Social Responsibility) and productivity of the plants are also important for seismic assessment. In this paper, authors proposed strategy for seismic assessment to select appropriate pre-earthquake upgrading and modification considering productivity of plants based on fault tree analysis. This assessment will enable to select weak damage modes and to allocate countermeasure cost appropriately to the selected damage modes.

*Key Words : Seismic risk assessment, Chemical plant facilities, Damage level, Fault tree, Productivity of plants*

## 1. はじめに

現在の化学プラントの耐震設計は、主に高圧ガス設備等耐震設計基準(通産省改正告示143号)の設計方法に準拠して行われている。同告示においては、「プラントの損傷あるいは機能喪失によるプラント外の被害を最小限にとどめる」ことを目標に、「供用期間中に発生する確率の高い地震動」および「供用期間中に発生する確率が低い直下型、海溝型の巨大地震による高いレベルの地震動」の2レベルの地震動について保有すべき耐震性能が規定されている。同告示の耐震目標は、公衆の安全を確保することにある。

企業の社会的責任が問われる今、公衆の安全確保は最重要課題であるが、「製品供給の確保」、「設備の維持および被害の抑止」といった企業活動の持続性も求められている。今後は、耐震設計に関して、従来の「安全性の確保」に加え、「運転性能の確保」が企業に求められるようになると思われる。

運転性能の確保のための施策には、地震被害を抑止する「リスクコントロール」と、被災後の運転資金を補填する「リスクファイナンス」とがあり、これらを組み合わせることが実際的であるが、リスクファイナンスの負荷を軽減するためにも、まずリスクコントロールを実施することが重要である。なお、リスクコントロールの具体策としては、新規物件であれば設計地震動レベルの引き上げ、既存物件であれば耐震補強が挙げられる。

ところで、安全性の確保に関しては冒頭で述べたように、通産省改正告示143号で規定されているのに対し、運転性能の確保については明確な性能規定はない。したがって、安全性を確保するという条件を満たすならば、運転性能の確保については企業経営者の判断により性能規定を行う必要がある。性能規定の方法としては、例えば、ライフサイクルコストを最小化するような耐震性能

評価が近年では注目されており、費用と便益の観点から性能の妥当性が検討されるようになってきた。

しかし、プラント構造物は、その機能の複雑さにより、耐震施策と耐震性能の向上との関係が明確ではない。そのため、耐震投資額と耐震性能向上とを関連付ける必要があり、さらに、最適な耐震施策でなくてはならない。ここで、「最適な耐震施策」とは費用対効果が最大となる施策を示し、株主への説明責任という観点からも重要なものである。

本研究では、運転性能の確保に着目して化学プラントの最適耐震投資を実現するために、その前提となる最適耐震施策の策定方法を提案・検討する。

## 2. 評価方法の枠組み

本研究で提案する評価方法は、設備の耐震対策の投資額、および地震時の運転性能のレベル(地震後の再運転までの期間または補修の要否など)を仮定することにより、対策の必要な箇所と補強の程度が設定できるものである。

この評価は次のような手順で行う。まず地震による被害を運転性能の観点から考慮した損傷程度の階級分け(以下、損傷レベル)を仮定する。仮定した損傷レベルごとのフォールト・ツリーを、設備の部材に生じる設備の性能を損なう要因(以下、損傷モード)を基本事象として作成する。さらに、損傷モードに対応する耐震補強対策の費用を概算し、これを用いてフォールト・ツリー全体の対策費用を算定する。

最終的には、損傷レベルごとの地震の地表面における震度に対する対策費用の関係および耐震性能向上に対する対策費用の関係を明らかにし、耐震対策の評価に適用する。

評価手順を図1の評価フローに、また評価フローの説明を以下の箇条書きに示す。

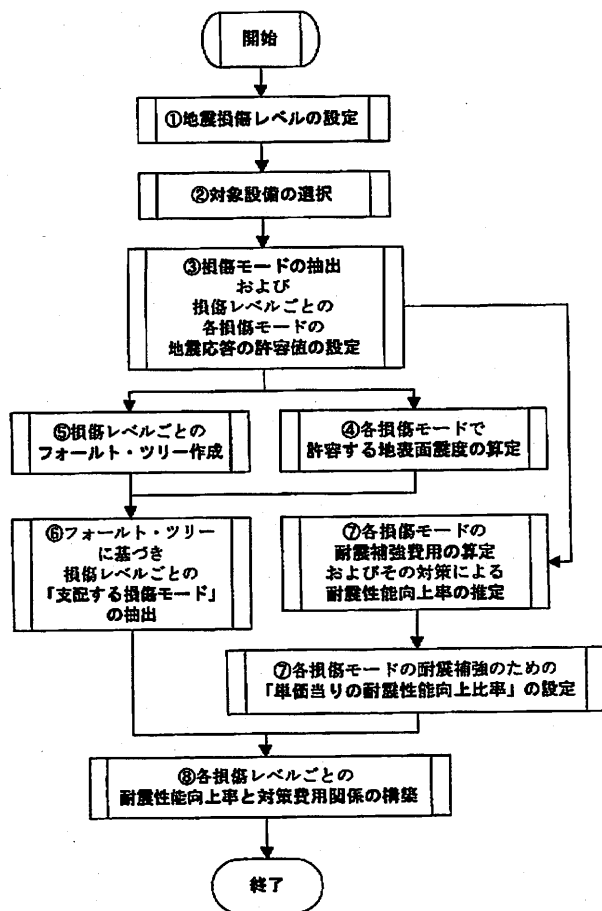


図1 評価フロー

- ① 地震損傷レベルの設定：プラント全体の地震による被害を運転性能の観点から耐震性能を評価するため、変形程度および損傷程度から判断して、運転状況および補修の要否を推定し、それらを尺度として、プラントの全体も含む対象設備に損傷レベルを設定する。
- ② 対象設備の選択：プラント全体の運転性能による損傷レベルを決定するときのプラントの運転に支配的な設備で、対策を実施する対象の範囲は、単一の設備から単一プロセスのまとまりとしてのユニット、さらにユニット集合体であるプラントの全設備までが考えられる。ここでは、評価対象とする設備および範囲を選択する。
- ③ 損傷モードの抽出：対象とする設備において、損傷モードを過去の震災事例、文献等から抽出する。それらの損傷モードは、地震応答の許容値で閾値を設定する。
- ④ 各損傷モードで許容する地表面震度の設定：対象とする設備の地震応答解析を行い、応答が許容値になる地震動の大きさの算定を行う。  
この算定された地震動の大きさの指標として、地表面における震度（地表面面に算定された加速度を重力加速度で割ったもの。以下、地表面震度）を用いる。

- ⑤ 損傷レベルごとのフォールト・ツリー (FT) の作成：プラントのような多くの部材、部品で構成される構造物の損傷モードを抽出するため、因果関係・発生過程のような定性的な分析と確率計算による定量的な分析を両立する手段であるフォールト・ツリー（以下、FT）を用いる。本評価法では、基本事象としての損傷モードと、設備としての損傷事象との関連付けを行うため、AND ゲートまたは OR ゲートを活用して FT を作成する。  
この FT は、対象設備並びに設備としての損傷事象（以下、設備の損傷事象）ごとに作成される。
- ⑥ 損傷レベルごとの「支配する損傷モード」の抽出：対象とする設備の損傷事象を決定している損傷モードを知るため、損傷レベルごとの FT を用いて、設備の損傷事象を決定する要因となる損傷モード（以下、「支配する損傷モード」）の抽出を行う。
- ⑦ 損傷モードの対策費用と耐震性能向上率の設定：損傷モードごとに費用対効果が最大の耐震対策を設定し、その耐震対策によって向上した耐震性能と、対策前の耐震性能との比率から求める割合を耐震性能向上率とする。  
次に設備全体の耐震対策を考えた場合、損傷レベルごとに「支配する損傷モード」の許容する地表面震度の内、最も小さい地表面震度と損傷レベルを設定した耐震対策の目標となる地表面震度の比率から設備全体としての耐震性能向上率を求める。  
さらに、損傷モードごとの耐震性能向上率は、耐震対策にかかる費用と、対策結果としての耐震性能の向上割合から「単価当りの耐震性能向上率」を求める。
- ⑧ 対策費用と耐震性能向上率との関係の構築：FT に基づき、損傷レベルごとに「支配する損傷モード」と「単価当りの耐震性能向上率」から、損傷レベルごとの地表面震度と対策費用および耐震性能向上率と対策費用の関係算定する。  
この場合、対象設備としての全体の対策費用は「支配する損傷モード」の対策費用の総和として算定する。

### 3. 耐震評価実施における FT 作成

本研究では、前章で提案した「評価方法の枠組み」を実際の設備を対象として FT の作成までを検討した。

#### (1) 損傷レベルの設定と対象設備の選択

運転性能の観点から耐震性能を評価した損傷レベルの設定事例を表1に示す。この表では、対象設備における具体的な損傷事例についても例示した。

本研究では対象設備として化学プラントにおける代表的な設備であるスカート有する自立式の塔類（以下、スカート支持塔）を対象設備とした。対象設備の外形を図2に示す。

#### (2) 損傷モードの抽出およびそれらの地表面震度

本設備の耐震設計は高圧ガス設備等耐震設計基準（通産省改正告示143号）（以下、耐震告示）を適用しているため、損傷モードは「耐震告示の指針<sup>3)</sup>に定義されている塑性率評価法で照査が求められている損傷モード」な



