

事故リスクと安全評価

Accident Risk and Safety Assessment

高 橋 英 明*

Hideaki Takahashi

1. はじめに

1975年に米国で原子炉安全研究（WASH-1400）が公刊されて以来、原子力発電所の安全評価に確率論的手法を用いることの有用性が広く認知されている。また石油・化学等の他の産業分野においても、同様の手法が適用され、潜在する事故の未然防止に重要な役割を果たしている。

本報では、確率論的な安全評価技術の概要と、リスクに基づいた意思決定について、および意思決定のための価値分析の重要性について述べる。

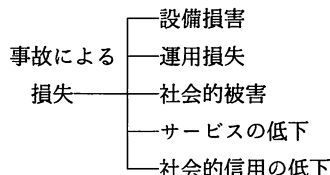
2. 安全評価と意思決定

危険に対する個人や社会の判断に係わる諸問題を、一般に安全問題という。安全問題は、

- ①新しい計画や既存の行為のどこに危険の源があるのか
- ②その大きさと発生頻度はどの位か
- ③それを制御する手段とその効果および費用の関係はどうか
- ④どの手段で対応するのが適当か

の4課題からなる。安全問題を定量的に検討するのが安全評価であり、多くの場合意思決定に至るステップを含んだものである。この意思決定のためにリスクという指標が使われることが多い。

リスクは一般的に「事象の発生確率×損害の大きさ」で表されるが、ここでいう「損害」とは「価値の損失」である。この価値には評価主体によって大きな違いが存在する。事故による損失は一般的に以下のように5つの価値項目に分けられるが、例えば原子力発電所と火力発電所とでは、特に社会的影響の大きさの違いにより、それぞれの価値項目の重みに違いが生じる。



この結果、原子力発電所の場合には設備や環境に重大な影響をもたらす事故の発生そのものをリスクの尺度として用いる場合が多い。これに対して火力発電所等の場合は、事故による運用損失や設備損害が主要な損失と考えられ、経済損失を主としたリスクの尺度を用いることができる。

このような価値基準に基づいて何らかの尺度によってリスクの意味が定義された後、その値が定量的に得られれば、これを意思決定に利用することができる。安全解析と安全評価は同じではなく、安全解析に諸々の損失に対する価値基準を加味した上で対策の検討に利用するのが安全評価である。前記の通り価値の意味合いは一意的なものではなく、評価対象および主体によって異なる。このためにリスクの定義は異なったものとなる。このような「価値」の特定がなされない場合には、リスクの定義が曖昧なものとなり、以下に述べる意思決定に評価結果を適切に活用することができないことに注意する必要がある。

意思決定とは基本的にいくつかの選択肢からの選択行為であり、他方で選択過程を明示し選択や考察を正当化する行為ともいえる。このために、望ましいものを選択する規範（価値基準）を提供し、これによってよく考慮された慎重で合理的な決定の支援または誘導を可能とするものである。

意思決定に当たっては、一般的に何らかの形態で問題の構造化を図ることが有効である。構造化のパターンには図-1に示したようなものがある。構造化手法の1つに Value-Focused Thinking (VFT) 法¹⁾があるが、これは種々提案されている多目的問題解決法を体系的に整理するとともに、意思決定者の価値観を

* ㈱三菱総合研究所 総合安全研究センター 安全工学第一室長
〒100 東京都千代田区大手町2-3-6

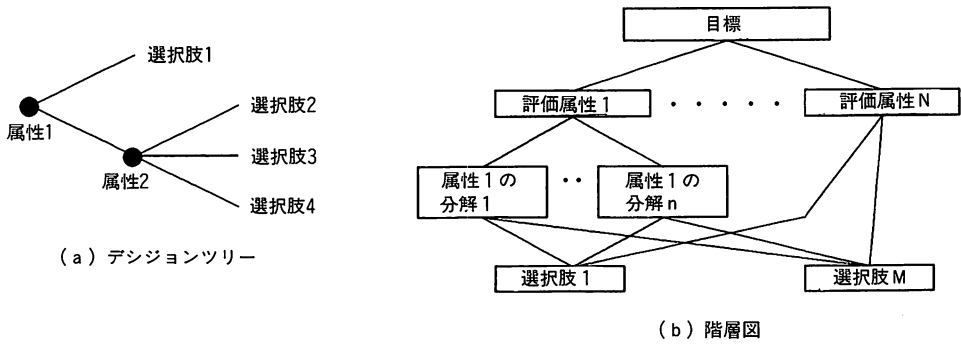


図-1 意思決定問題の構造化パターン例

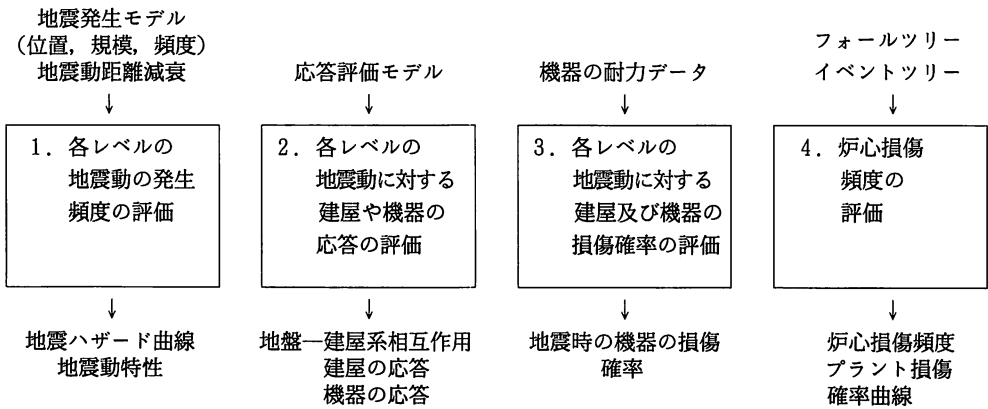


図-2 原子力発電所における確率論的地震リスク評価の手順

視点の中心において、評価体系や選択枝の創出が可能となるように問題の表現様式を構造化した手法である。VFT法における基本的な問題表現の手順を以下に示す。

<手順>

- ①意思決定者の戦略的に重要な目的を設定する。
- ②戦略的目的に基づき、基本目的を階層的に構造化する。
- ③基本目的と対応させた、手段-目的効果ネットワークを構成する。
- ④基本目的階層を具体的評価項目で記述できるレベルにまでブレイクダウンする。このレベルの基本目的構造に基づき、具体的な評価体系を構築する。
- ⑤手段-目的効果ネットワークを具体的な手段にまでブレイクダウンする。具体的手段に基づき、選択枝を設定する。
- ⑥得られた評価体系および選択枝について、適切な多目的意思決定法を適用し、定式化を行う。(多目的意思決定法として、多属性効用関数法や階層

分析法などがあげられる)

安全評価によって得られるリスクの定量的情報は、上記の⑥のステップにおいて活用される。

3. 確率論的安全評価

リスクという言葉は、一般に潜在する危険をも包含するものであり、これを取り扱うために事象の発生を確率的に考慮する。リスクの構成要素である事象毎の発生確率とそのもたらす被害を、潜在的な事象をも対象として計算する手法を、確率論的安全評価 (PSA) または確率論的リスク評価 (PRA) という。

確率論的安全評価手法は、従来の規制に用いられてきた決定論的安全評価手法とは、概念も方法論も著しく異なっている。原子力発電所における決定論的安全評価では、立地・設計・建設・運転の各段階で十分に保守的な基準を設け、それをすべて満足すれば施設の安全性は十分高く保たれると考える。この評価では、通例ごく少数の代表的(あるいは多くの事故を包括するような)事故を想定(単一故障を仮定)し、その事

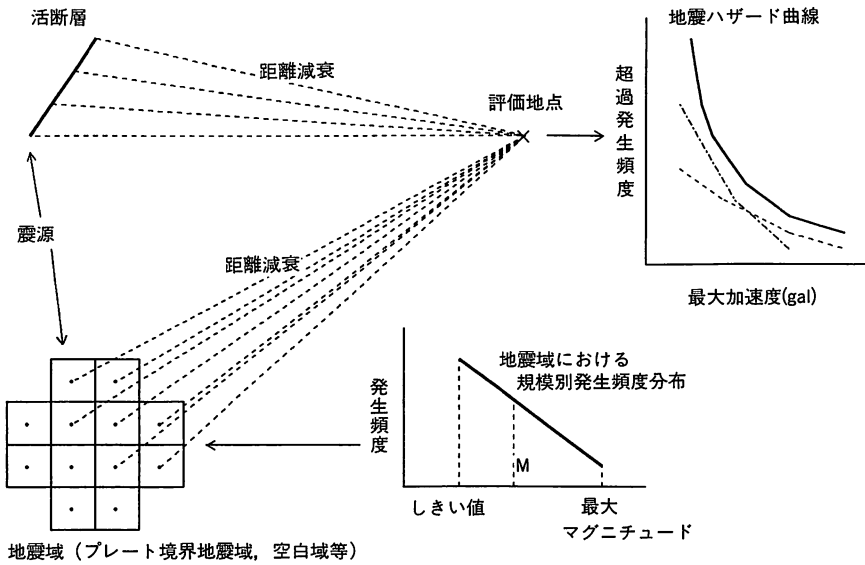


図-3 複数の震源からの地震動の評価の概要

故を十分な保守性をもって解析してもなお、あらかじめ設定した安全基準を満足することをもって、安全性を保証する。

一方確率論的安全評価の一般的なアプローチは次の通りであり、発生確率および影響の度合いの観点から、可能性のあるすべての事故・事象（多重故障を含む）を評価の対象とする。

- ①被害の発生に寄与する主要な事故・事象の同定
- ②被害の発生に至る事象シーケンスの同定
- ③各事象の発生確率の分析
- ④各事象シーケンスのもたらす被害の分析
- ⑤総合的なリスクの分析

最大被害をもたらす事故が最も大きなリスクをもっては限らない。確率論的安全評価は、一貫した論理に基づいて総合的に安全問題を分析できるという特徴を持っている。地震、火災、浸水といった外的要因による事象についても、設備の内的要因による事故・事象と同じように評価され、統一的な尺度でもって総合的に比較・分析できる。

原子力発電所の内的事象を対象とした確率論的安全評価の手順については、以前から詳細な解説がなされている^{2,3)}。またその評価結果は一般に公開されるようになってきている。以下、本節では、地震や火災といった外部事象に対する確率論的安全評価の概要について説明する。

(1) 地震に対する確率論的安全評価

地震に対する確率論的安全評価の手順の概要を図-2に示す。第一のステップで得られる地震ハザード曲線は、各サイトで発生する各レベルの地震動（最大加速度等）の1年あたりの発生頻度を表すものである。地震の発生メカニズムを理解し、将来の地震の発生位置、時期、規模を正確に予測することは極めて困難であるが、地震の発生を確率事象とみなすことにより、発生する地震動強度の確率分布を求めることができる。すなわち確率論的思考により、可能性のあるあらゆる地震を総合的に考慮した地震リスクを推定することができる。

このような考えに基づき、次のようなステップを踏んで地震ハザード曲線を算出する。

- ①問題の地点周辺の地域における地震の発生メカニズムを同定し、地震の規模別発生頻度を推定する。このために、活断層データや歴史地震データを利用する。
- ②それらの複数の震源から、当該地点に地震波が到達するまでの減衰を考慮し、最大地震動（加速度）を算定する。活断層（線震源）および地震域（面震源）からの寄与の評価の概要を図-3に示す。
- ③局地的地盤の影響を算定する。

ある最大加速度の地震動が発電所が設置された地盤に与えられた時、建屋や機器はその地震動レベルに応

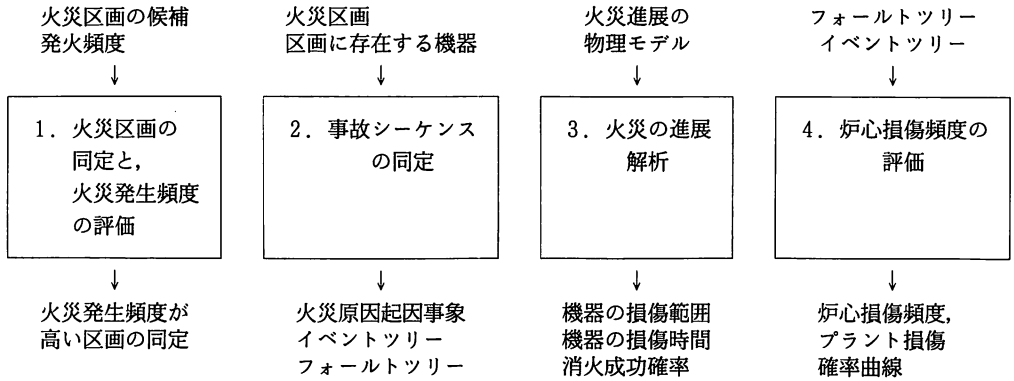


図-4 原子力発電所における確率論的 화재リスク評価の手順

じて振動する。この振動を建屋や機器の「応答」という。図-2の第二ステップでは、これを評価する。

機器を振動させ、振動のレベルを上げていくと、あるレベルに達したときに機器は機能喪失や誤作動、あるいは構造的損傷に至る。以下ではこれらをまとめて単に「故障」と表現する。故障が起きる振動レベルを機器の「耐力」という。機器の応答が機器の耐力を上回れば、機器は故障する。

地盤における地震動や機器の耐力には不確実さやばらつきがあるため、これらはある確率分布を持つものとして扱われる。このため、機器の故障も起きるか起きないかではなく、確率値で表される。これが地震による機器の「故障確率」であり、図-2のステップ3で評価される。

ステップ4における事故シーケンスの発生頻度の算出手順は、基本的に内的事象に対する確率論的安全評価と同様であり、次のステップを踏んで炉心損傷事故の発生頻度を評価する。

- ①炉心損傷に至るあらゆる事故のシーケンスを同定する。事故シーケンスは、炉心損傷事故の引き金となる起因事象（例えば、冷却材喪失事故や外部電源喪失）毎に、事故の拡大を抑えるための安全設備（例えば、非常用炉心冷却設備や非常用電源設備）それぞれが成功するか失敗するかで場合分けを行って定義する。
- ②数多くの事故シーケンスを系統的に定義・表現するために、「イベントツリー」を作成する。
- ③各安全設備が機能喪失する原因と確率を、「フォールトツリー」を作成して同定し、評価する。地震動による複数の機器の故障の相関を考慮する。
- ④各事故シーケンスの進展確率と起因事象発生確率

から、各地震動レベル毎に事故シーケンスの条件付き発生確率を評価する。

- ⑤各レベルの地震動の発生頻度を加味し、炉心損傷事故の発生頻度の合計値を算出する。

(2) 火災に対する確率論的安全評価

火災に対する確率論的安全評価の手順の概要を図-4に示す。第一のステップでは、安全設備に関連した機器または電気設備あるいは制御設備のある区画に対して火災発生頻度を求める。このために火災データベース等を利用する。

第二ステップでは、各火災区画における火災のそれぞれに対し、何が起こり得るかを検討し、炉心損傷事故の起因事象を選定する。この起因事象に始まるイベントツリーを作成するが、その際、火災発生によるプラント状態（複数の機器が火災により同時に機能喪失を起す）を考慮に入れる。フォールトツリーの作成も、火災発生時の状態を考慮して行う。

第三ステップでは、火災発生後火災が物理的にどのように進展するのかを評価する。これにより、時間経過とともにどの範囲の機器が損傷するかを推定する。また解析の結果、機器が損傷するまでの時間が得られるので、その間における消火成功確率を評価する。

第四ステップでは、火災発生頻度、火災による機器の損傷確率、消火成功確率等の値を用いて、イベントツリーの解析を行い、炉心損傷事故の発生頻度を評価する。

4. リスクベースの意思決定

原子力発電所を例として確率論的安全評価の現状について説明したが、諸外国においては危険物を扱う他の分野においても、確率論的な思考に基づいて潜在す

るリスクが評価され、様々な管理や意思決定に利用されている。

ECは、プロセス産業の重大事故によるリスクを抑制することを目的として、1982年に「特定の工業活動の重大事故の危険性についての理事会指令」（いわゆるセベソ指令）を発令し、加盟各国に対して危険性を伴う産業活動に対してその危険性を制御する厳しい立法措置を求めた。後に各国において「定量的なリスク解析」の法制化という形で結実し、ECや米国の化学産業における安全管理の方式は、このセベソ指令を境にして劇的な変貌を遂げた。つまり伝統的な注意義務遵守をベースにした「規制型」から、「リスク管理型」へと移行した。

またOECDが1988年に発行した「危険性物質に係わる防災基本指針」⁴⁾においては、危険性物質に係わる事故の防止にあたり、「ゼロ災」という最終目標への到達を目指すことを求める一方、この目標への到達のために行政機関による安全目標の制定及び規制枠組みの設定、および企業による安全方針の策定を求めている。すなわち、行政機関に対しては、

- ・長期的戦略の一環として適切な安全目標を設定しなければならない
- ・事故防止のあらゆる局面を網羅した、明確かつ整合性のある規制枠組みを設定しなければならない

とし、企業に対しては、

- ・当該企業内の最高水準で合意され、公表され、適用される、明確かつ意味のある「安全方針」を持たなければならない。これは、企業の安全意識を反映し、「ゼロ災」という最終目標および行政機関によって設定された安全目標を盛り込んだものでなければならない。

とし、最終目標への到達は、次のことによって促進できるとしている。

- ・安全関連の目標を設定する
- ・その目標を公表する
- ・目標の達成に向けた進捗度を測定する

行政および企業の安全目標については、具体的には示していないが、あらゆる事故の局面を想定し合理的な対策を策定するには、確率論的な思考方法が必要とされる。また本指針の中ではリスクという用語が頻繁に使用されており、「定量的なリスク評価が安全の問題に関する意思決定に目安を与える」としている。このことから、定量的なリスクの把握に基づいた安全目標の策定と、意思決定が求められているものと判断で

きる。

同指針においては、設計のできるだけ早い段階で危険性を特定し、その程度を評価して危険性を排除または低減する最適の方法を設定するために、危険度解析、HAZOP（オペラビリティスタディ）、フォールトツリー解析、イベントツリー解析等の客観的審査技術を利用することとしており、これらの検討には、用役の停止、電圧の変動、地震、異常気象など異常な外部要因およびプロセスの危険性を考慮に入れることとしている。

現在、欧米の多くの企業では、安全解析を担当するチームがリスクベースの意思決定のための情報を提供することが一般的となっている。

原子力発電の分野においても、論理的にはゼロと言えない何らかの危険度、リスクが存在することをやむなく容認するとの認識の認識の上で、確率論的安全評価を規制の合理的なあり方、あるいは透明性のある規制の方向に活かす努力が続けられている。

米国においては、従来からリスク評価に基づいて、安全上重要な因子の特定や有効な安全対策の策定が行われており、すべての発電所を対象として確率論的安全評価が実施されている。ここで得られた情報を利用して、安全への投資効率を考慮した合理的な規制や規制緩和へ向けた研究が進められている。

行政側は、規制措置の見直しや策定においてリスクベースの規制（Risk Based Regulation）の考え方をより積極的に取り入れ、

- ①既存の規制措置を安全性の寄与度により見直す。
すなわち、リスクの観点から重要な設備を明らかにし、改善を図る。またバランスの悪い要求があればそれを変更する。

②将来の規制措置は定量的な安全性の向上度を考慮して策定する
などの見通しを示している。

一方産業界側は、コスト・ベネフィット解析に基づいた合理的な安全対策の判断基準を提案し、自主的な保安措置の策定に積極的である。プラントのリスクを継続的に評価することにより、プラントの安全性と効率性の両方を改善することができる。安全性の面であり重要でない構造物、システム、機器については、試験や保守に関する投資を軽減し、逆に安全性の面であり重要な機器に対して注意を集中させる（意図された機能が果たされることを保障するためのモニタリング等による）ことによって、プラント全体の安全性を

向上させることが可能である。品質管理要求に対してリスクベースで優先度を評価することにより、安全性を維持したまま運転管理費の大幅な削減が可能であるとの試算もなされている。

- このように、リスク評価によって得られた情報は、
- ① 運転手順の見直しや付加的な安全設備の導入は、費用対効果の分析に基づいた検討を行う
 - ② 行政側の観点からは、リスクの低減効果と費用の比較による規制の正当化を図る
 - ③ 事業者の観点からは、実際に必要な対策の正当化を図る
 - ④ 行政側が安全目標を定量的に示し、事業者はこれを満足するべく提案を示す
 - ⑤ 事業者が内部基準としての積極的な定量的安全目標を作成する
 - ⑥ 安全指針等の体系化を図る
 - ⑦ リスクベースの運転管理による合理化検討を図る（規制緩和）

ことなどに利用されつつある。

5. おわりに

「地域社会との関係強化」および「責任範囲の変化」も含めた、安全に関する国際的な動向に対応していくには、従来のように既存の知識をベースにした安全基準を守るだけでは不十分であり、積極的に損害や事故の原因となるリスク源を発見し、事前に有効な対策を講ずる必要がある。この安全配慮義務の原則は、産業の種類を問わず波及しつつある。

このような状況の中で、安全評価の目的は、安全審

査への対応を目的とした設計評価に加え、設備投資や安全投資の効率化・最適化を目的とするなどの意思決定を伴うものに発展してきた。ここで、リスクという定量的な表現が可能な尺度を用いて安全性を示すとともに、共通の尺度に基づいて総合的に安全性の比較や議論を行い、リスクの管理が行われるようになってきた。

このような意思決定の過程においては、安全やリスクを評価すること自体が目的ではなく、意思決定のための1つの情報を提供することが目的である。この認識がないと、評価結果の数値だけが一人歩きしてしまうことになる。さらに、最終的な意思決定や問題解決のためには明確な価値基準が必要である。価値基準に基づいた価値分析と意思決定の手続きが確立していなければ、安全評価の有用性は半減してしまう。意思決定の主体が明確な価値基準を持つことが必要であるが、価値が多様化・複雑化した現代においては、安全評価と同様に価値分析も技術的に難度の高い問題である。

参考文献

- 1) R.L.Keeney; Value-Focused Thinking, Harvard University Press (1992).
- 2) 近藤駿介等; 原子力発電所の確率論的安全評価, 日本原子力学会誌, Vol.28, No. 12 (1986), 1096-1128.
- 3) 確率論的安全評価 (PSA) 実施手順に関する調査検討, 原子力安全研究協会 (1992).
- 4) OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response, (1992).

協賛行事ごあんない 「第4回 微粒化シンポジウム」について

〔主催〕日本液体微粒化学会, 日本エネルギー学会

〔協賛〕ILASS-Korea, 化学工学会他

〔開催日〕平成7年12月21日(水)~22日(木)

〔場所〕同志社大学 田辺校地
(京都府綴喜郡田辺町多々羅都谷1-3)

〔テーマ〕「ウィングを拡げる微粒化の世界」

〔参加申込締切〕平成7年11月30日(水)

〔参加問合せ先〕

〒223 横浜市港北町日吉3-14-1

慶應義塾大学理工学部機械工学科

日本液体微粒化学会事務局 徳岡 直幹

TEL 045-563-1141 (ext 3196)

FAX 045-563-5943