

4.8 原子カプラント及び構成機器を対象とした確率論的安全評価 (PSA) への利用

4.8.1 原子力施設の確率論的安全評価

原子カプラントの確率論的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)では、原子カプラントで最も過酷な炉心損傷に至る有意な事故について発生頻度と発生時の影響を評価する。事故の発端となるトラブルの中には、原子力施設内の機器のランダムな故障や運転員の誤操作等、プラントやシステムに内在する原因によって起きる内的事象や、地震や火災・航空機の墜落等、外部からの衝撃によって起きる外的事象とがある。外的事象のうち、地震事象を対象とした PSA の 1 タスクとして確率論的地震ハザード (以下地震ハザードという) 評価が用いられている。

PSA は、図 4.8.1 に示すように評価の内容によってレベル 1～3 の 3 レベルに大別される。レベル 1 PSA は、炉心損傷事故の発生頻度(CDF :Core Damage Frequency)を評価する。レベル 2 PSA は、炉心損傷によって放出される放射性物質の挙動を評価する。レベル 3 PSA は、CDF と放射性物質の挙動を用いて公衆の被曝量を評価する。これらのうち、レベル 2 及び 3 PSA 手法は、上記内的及び外的事象の全てに共通に用いられるものであるが、レベル 1 PSA 手法は対象とする事象毎に評価手法が異なる。

原子力安全委員会では、原子力施設の安全目標の検討を進め、「原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の 1 程度を越えないように抑制されるべきである」ことを中間報告として取りまとめた¹⁾。また、安全目標に対応する性能目標としての放射性物質の早期大量放出(LERF: Large Early Release Frequency)や CDF に関する検討も進めている。安全目標がレベル 3 PSA、LERF がレベル 2 PSA、CDF がレベル 1 PSA に対応するもので、これらがレベル 1～3 PSA の各段階でのリスクの目安となることが想定される。

以下、レベル 1 地震 PSA (以下地震 PSA という) 手法及びその適用例について、地震ハザードの観点に着目して記述する。

4.8.2 地震 PSA 手法

(1) 地震 PSA 手順及び不確定性評価

1) 地震 PSA 手順

地震 PSA 手順を図 4.8.1 内に示す。同手順は、① 地震ハザード評価、② 構造物・機器の現実的応答・耐力・フラジリティー評価、③ 事故シーケンス・炉心損傷事故発生頻度評価の各タスクからなる²⁾。

CDF は、地震ハザード $H(\alpha)$ (回/年) と炉心損傷発生確率 $CDP(\alpha)$ を用いて次式で評価される。

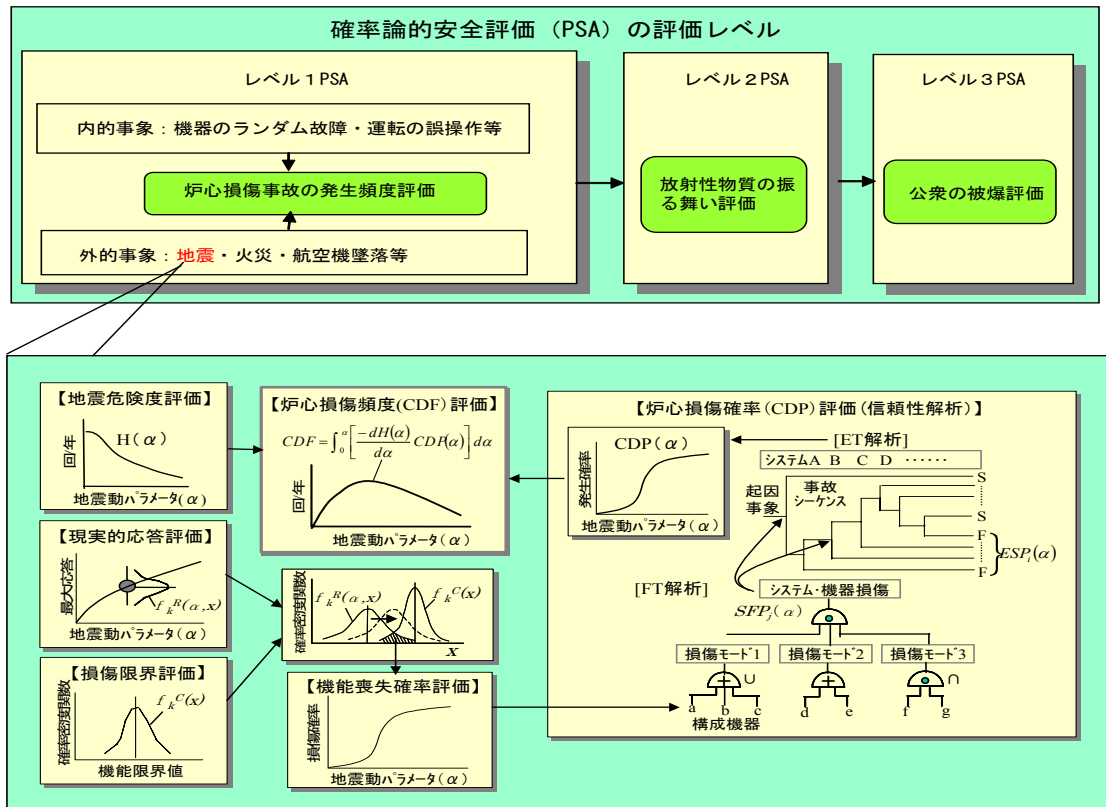


図 4.8.1 原子力施設の確率論的安全評価 (PSA) のレベルと地震 PSA 手順

$$CDF = \int_0^{\alpha} \left[\frac{-dH(\alpha)}{d\alpha} CDP(\alpha) \right] d\alpha \quad (4.8.1)$$

ここで、 $H(\alpha)$ (回/年) は解放基盤での最大加速度等の地震動パラメータ (α) の年超過発生頻度を、 $CDP(\alpha)$ は α に対する炉心損傷発生確率を表す。また、 $CDP(\alpha)$ は、炉心損傷事故をもたらす事故シーケンス i の発生確率 $ESP_i(\alpha)$ の総和として次式で求められる。

$$CDP(\alpha) = \sum_{i=1}^n ESP_i(\alpha) \quad (4.8.2)$$

$ESP_i(\alpha)$ は、事故の進展過程を表すイベントツリー (ET: Event Tree) と ET 内の緩和系 j の機能喪失確率 $SFP_j(\alpha)$ を用いて ET 解析で求められる。 $SFP_j(\alpha)$ は、図 4.8.1 中に示したように、緩和系の機能喪失過程を表すフォールトツリー (FT: Fault Tree) と FT を構成する機器 k の機能喪失確率 $CFP_k(\alpha)$ を用いて FT 解析で求められる。 $CFP_k(\alpha)$ は、機器 k の現実的応答 $f_k^R(\alpha, x)$ が機能喪失限界 $f_k^C(x)$ を上回る時の条件付き損傷確率として次式で求められる。

$$CFP_k(\alpha) = \int_0^{\infty} f_k^R(\alpha, x) \left[\int_0^x f_k^C(x) dx \right] dx \quad (4.8.3)$$

(4.8.3)式において、 $f_k^R(\alpha, x)$ と $f_k^C(x)$ は互いに独立な対数正規分布で表されると仮定し、それぞれ次式で表わされる。

$$f_k^R(\alpha, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_R x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln M_R)^2}{2\beta_R^2}\right] \quad (4.8.4)$$

$$f_k^C(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_k^C x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln M_k^C)^2}{2(\beta_k^C)^2}\right] \quad (4.8.5)$$

ここで、 M_R 及び β_R と M^C 及び β^C は、 $f_k^R(\alpha, x)$ 及び $f_k^C(x)$ の中央値及び対数標準偏差を表し、 x は加速度や応力等応答や機能喪失限界を表わすパラメータである。

2) 不確定性評価

地震 PSA では、地震ハザード評価、構造物・機器の現実的応答・耐力・フラジリティ評価、事故シーケンス・炉心損傷事故発生頻度評価における不確定性をもたらす要因を次の2つに大別される。これらのうち、後者の要因を対象として不確定性評価が行われる。

- ・物理現象固有のランダム性による不確定性
 - ・材料特性などに見られるように、対象とする物事が本来的に持つばらつき特性によるもので、ばらつきをそれ以上減じることができないものを指す。
 - ・物理的不確定性 (physical uncertainty) やランダム性、偶発性 (randomness) 等と呼ばれる性質によるものも含まれる。
- ・知識や認識に係わる不確定性
 - ・知識の欠如、モデル化や評価プロセスに含まれる不確定性、解釈の相違などを表し、将来対象とする物事についての知識の増加や科学の発展によりその不確定性を減じることが期待できるものを指す。
 - ・統計的不確定性やモデル化不確定性と呼ばれる性質によるものも含まれる。地震ハザード評価における不確定性評価は、ロジックツリーを用いて行われる。ロジックツリーの内容については、前述の3章で記述する通りである。

(2) 各タスクの概要

上記①～③の各タスクの概要について、地震ハザードに係わる内容を中心に述べる。

1) 地震ハザード評価

地震ハザードは、任意の基盤での地震動の大きさ（最大加速度、速度、等）とその年超過確率/年超過頻度（回/年）との関係で定義され、図 4.8.1 中に示すような地震

ハザード曲線として表される。地震 PSA における地震ハザードの役割としては、次の 2 つがある。

イ) 炉心損傷頻度評価のための入力

ロ) 構造物・機器のフラジリティー評価における地震応答評価のための入力

イ) については、前述の(4.8.1)式に示されるように、最大加速度をパラメータとする地震ハザードとして用いられる。ロ) については、(4.8.3)式で表す構造物・機器のフラジリティー評価における応答項、即ち、(4.8.4)式で表す現実的応答分布を求めるための入力として用いられる。ロ) においては、構造物・機器のフラジリティー評価手法の違いによって、地震ハザードの用いられ方が異なり、地震ハザードとしては、次の 3 つの表示が行われる。これらの具体的な内容については、後述の 2) で述べる。

イ) 構造物・機器フラジリティー評価手法における詳細法³⁾として用いる場合

- ・一様ハザードスペクトルとして表示
- ・地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離として表示

ロ) 構造物・機器フラジリティー評価手法における簡易法³⁾ (安全係数法³⁾ ともいう) として用いる場合

- ・最大加速度として表示

2) 構造物・機器の現実的応答・耐力・フラジリティー評価

構造物・機器のフラジリティー評価手法には、次の 2 つの手法が提案されており³⁾、(4.8.3)式で表される現実的応答分布の求め方が異なる。

①現実的応答を詳細法で評価する場合

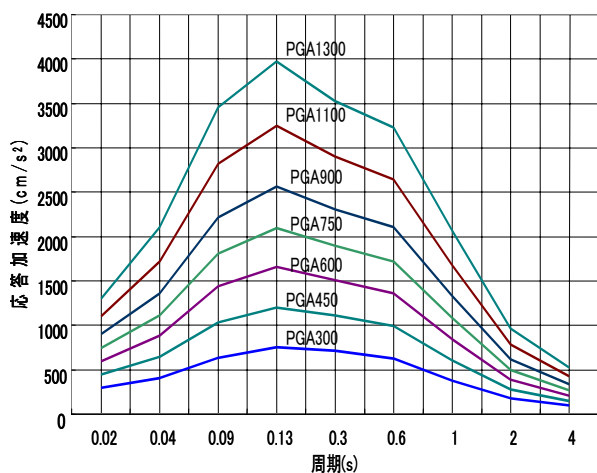
②現実的応答を簡易法で評価する場合

①の場合では、現実的応答を時刻歴波形と振動モデルを用いて求めるので、時刻歴波形が必要となる。この波形は、目標スペクトルを設定し、これを満足するような正弦波の合成から求められる。この目標スペクトルの作成方法には、図 4.8.2 の例に示すように次の 2 つの方法がある。

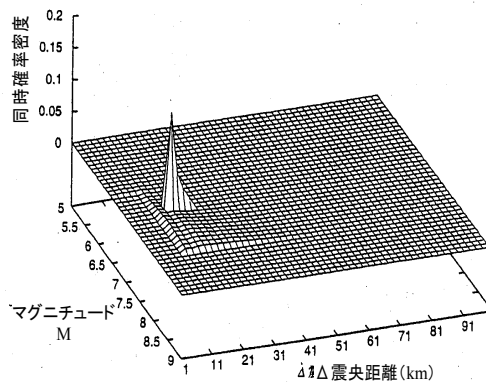
①-1 一様ハザードスペクトルを用いる場合

応答スペクトル距離減衰式を用いて、一様ハザードスペクトルを求める。これを目標スペクトルとし、時刻歴波形を評価する。

①-2 地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離を用いる場合
亀田・石川の方法⁴⁾、McGuire の方法⁵⁾、NUPEC の方法⁶⁾等により、任意の超過確率に寄与する想定地震のマグニチュードと距離を求める。これらと応答スペクトル距離減衰式を用いて目標スペクトルを求める。この目標スペクトルを満足するように時刻歴波を求める。



(a) 一様ハザードスペクトル



M, Δ の同時確率密度

($T=0.1$ 秒, 年超過確率 10^{-5} , $S_a=1970\text{cm/s}^2$ 以上)

(b) 地震ハザード再分解による想定地震の規模・距離

図 4.8.2 時刻歴波作成用目標応答スペクトルの設定方法

②の場合では、現時的応答を設計応答値と応答係数（設計応答値の保守性を係数で表したもの）を用いて表す。応答係数評価の一環として、設計用地震動の保守性に係わる応答係数は、設計用応答スペクトルと地震ハザードから求めた応答スペクトルとの比として求められる^{3),7)}。この応答スペクトルの評価に活用される。

以上のように地震 PSA における地震ハザードは、構造物・機器のフラジリティー評価における応答評価とセットで用いられる。

3) 事故シーケンス・炉心損傷事故発生頻度評価

事故シーケンス発生頻度評価では、まず、炉心損傷に至るあらゆる事故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毎に、事故の拡大を抑えるための緩和系それぞれの機能が成功するか失敗するかどうかで場合分けを行って定義される。事故シーケンスを系統図にイベントツリーを用いて表す。各緩和系が機能喪失に至る系統図をフォールトツリーを用いて表す。炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を合計して炉心損傷頻度を評価する。一連の評価では、不確定性評価も行うが、不確定性評価には一般的にモンテカルロサンプリングが用いられる。

地震 PSA の事故シーケンス評価では、内の事象と異なる特有の取り扱いが行われるが、地震ハザードに関連するものを挙げる。強地震動下では、複数の機器が同時に損傷する、いわゆる共通原因損傷が生じると考えられる。そのため、地震 PSA では、事故シーケンス評価でのフォールトツリー解析において、複数機器間の損傷の相関^{8),9)}を考慮する必要がある。機器の損傷の相関は、機器間の応答の相関と耐力の相関によ

って表されるが、耐力の相関は完全独立と仮定されるので、応答の相関だけが考慮される。

応答の相関は、入力動の周波数特性と機器の振動特性による共振挙動の相関として表されるので、それに影響を及ぼす要因（入力地震動の周波数特性・振幅、機器設置建屋の違い、同一建屋内での機器設置階の違い、機器の減衰定数・固有周期の違い）を考慮する必要がある⁹⁾。これらの要因のうちの入力地震動の周波数特性は、前述 2) の構造物・機器のフラジリティー評価における詳細法によって地震ハザード曲線から求められる。

4.8.3 地震 PSA 手法の適用例

地震 PSA 手法の適用例として、原子力施設の CDF の評価例と、機器免震技術による地震リスクの低減効果に関する評価例を記述する。

(1) 原子力施設の地震リスク評価の例

日本原子力研究所（原研）や独立行政法人原子力安全基盤機構（原安機構）では、前述の 4.8.2(1)の地震 PSA 手法を用いて CDF を評価しているため、それらの概要について述べる。原研では、我が国の東北地方の太平洋岸サイトに 110 万 kWe 級の沸騰水型原子炉プラントを仮想して、軽水炉モデルプラントの地震 PSA を実施した。そして、重要事故シーケンスとしては、崩壊熱除去失敗シーケンスや全交流電源喪失シーケンスが、重要機器としては、碍管付き起動変圧器、電気盤、非常用ディーゼル発電機が同定されたこと等が挙げられている¹⁰⁾。

一方、原安機構では、代表的な沸騰水型及び加圧水型原子炉プラントを対象とした CDF の評価を実施している。重要機器としては、横置きポンプ、電気盤、制御棒等が挙げられている¹¹⁾。

(2) 機器免震性能設計法と機器免震技術による地震リスク低減の評価

1) 評価手法

原研では、地震リスク低減技術として機器免震技術に着目した研究を行った。同研究では、地震 PSA で同定された安全上重要な機器に免震技術を導入した場合の有効性評価手法⁸⁾及び評価コード¹²⁾を開発した。また、同手法の高度化のために、2次元及び3次元機器免震システムを設計・製作し、振動台試験や自然地震動による試験を実施して、動的応答挙動や免震効果を明らかにした^{13)～15)}。更に、機器免震系の機能限界評価手法を提案すると共に、限界試験を行い限界値の定量評価を行った²⁾。これらの高度化を通し、CDF を性能目標とした確率論的手法に基づく機器免震性能設計法を開発すると共に、機器免震化による地震リスクの低減効果を評価した²⁾。

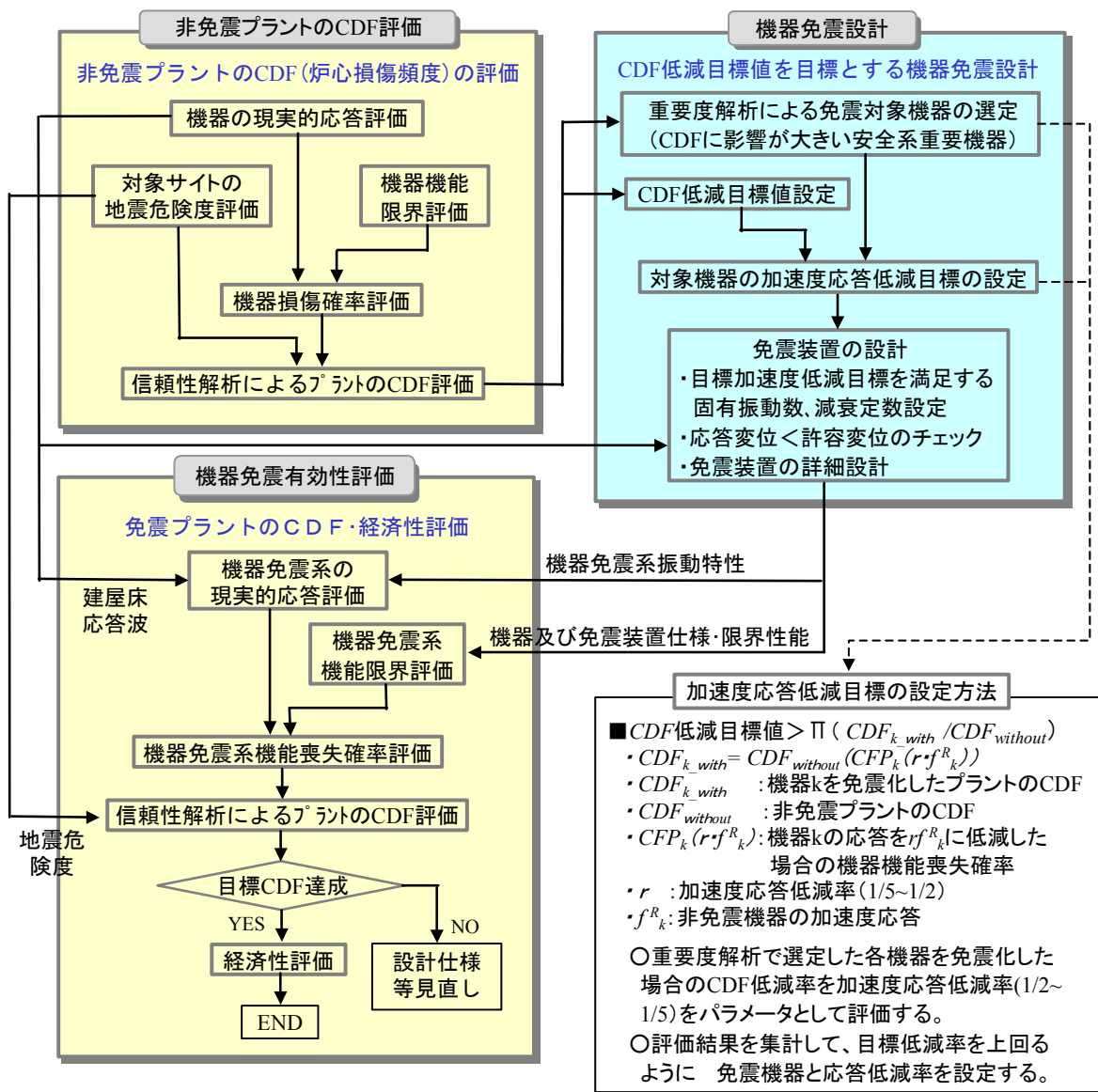


図 4. 8. 3 機器免震性能設計及び地震リスク低減評価手順

機器免震性能設計法と地震リスク低減評価の手順は、図 4. 8. 3 に示すように以下の通りである。

- ① 地震 PSA 手法を用いて、上記(1)のように非免震プラントの炉心損傷頻度 ($CDF_{without}$) を評価する。
- ② プラントの安全目標が炉心損傷頻度 CDF_{target} として与えられると仮定して、 CDF_{target} と $CDF_{without}$ との比を機器免震の設計目標性能として設定する。
- ③ $CDF_{without}$ に大きく寄与する安全上重要な機器を対象として免震対象機器を選定する。
- ④ 選定した機器の加速度応答低減率 (免震機器の加速度応答/非免震機器の加速度

応答) をパラメータとして、CDF の設計目標性能を満足するように、各機器の加速度応答低減率を設定する。

- ⑤ 加速度応答低減率を満足する固有振動数及び減衰定数を設定し、与条件を考慮して免震系を設計する。
- ⑥ 免震対象機器について、応答、機能限界及び損傷確率を評価し、免震プラントの CDF_{with} を求める。CDF の低減目標値を満足していない場合は、対象機器の追加・見直しや、機器免震系の振動特性を修正する等再設計を行う。
- ⑦ 非免震機器と比較して、コストを評価する (コスト評価手法の内容を後述の(3)で述べる)。

2) 評価例

原研では、仮想原子力プラントを想定し、外部電源喪失事象を対象として、安全係数法を用いて試評価を行い、安全上重要な機器を同定した。これらの機器を免震化した場合の非免震プラントに対する炉心損傷頻度低減効果を評価した。評価の結果、重要機器のうち、特に外管付き起動変圧器と非常用ディーゼル発電器を免震化した場合に、炉心損傷頻度の低減効果が大きく、免震化により加速度応答が非免震機器の 1/5 に低減されることや、CDF が 1/10 程度まで低減できる可能性があることが明らかにされた²⁾。

また、評価精度の向上を図るために、評価手法の高度化の1つとして、サイト近傍地震動を詳細に評価する、震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法の開発が示されている。

(3) 機器免震技術のコスト評価

1) 手法の概要

原研では、図 4.8.4 に示す機器免震技術のコスト評価手法を開発した¹⁶⁾。同手法は、供用期間中の非免震機器の総期待費用と免震化した機器の総期待費用を比較して、機器免震のコストを評価するものであり、後述の機器供用期間中の損傷確率評価に地震ハザード評価が用いられている。

非免震機器の総期待費用 $TC_{without}$ は次式で表わされる。

$$TC_{without} = IC_{without}^C + FP_{without} (FC_{without}^C + FC^{ID_1} + FC^{ID_2}) \quad (4.8.6)$$

ここで、右辺第1項の $IC_{without}^C$ は、非免震機器の初期費を表わす。第2項のカッコ内は地震による損害費用を表し、 $FC_{without}^C$ は機器の直接損害費、 FC^{ID_1} は間接被害として、電力や運輸基盤等の要因の損失によりもたらされる直接的な第1次生産の減少費、 FC^{ID_2} は第1生産減少の波及によって生じる2次的な生産減少費を表す。 $FP_{without}$ は非免震機器の供用期間中での損傷確率で、供用期間 t (年)での損傷頻度 CDF (回/年)

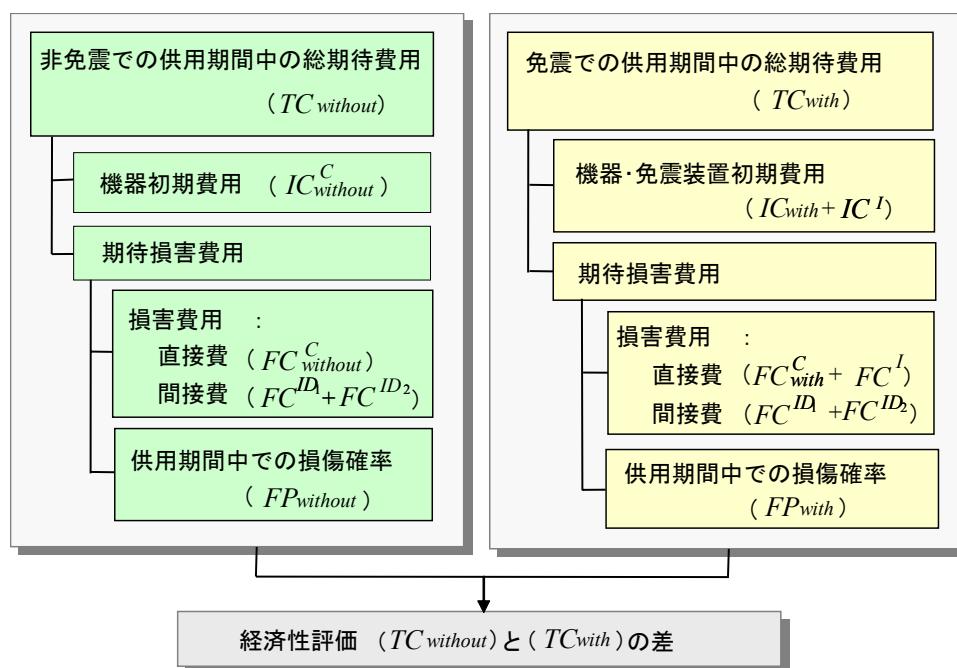


図 4.8.4 機器免震のコスト評価手法

を用いて次式で表される。CDF 評価の中に(4.8.1)式に示す地震ハザード評価が用いられている。

$$FP_{without}(t) = 1 - \exp(-CDF \ t) \quad (4.8.7)$$

免震機器の総期待費用 TC_{with} は次式で表される。

$$TC_{with} = IC_{with}^C + IC^I + FP_{with} (FC_{with}^C + FC^I + FC^{ID_1} + FC^{ID_2}) \quad (4.8.8)$$

ここで、第 1 項及び 2 項は初期費で、 IC_{with}^C は機器費、 IC^I は免震装置費を表す。第 3 項のカッコ内は損害費を表し、 FC_{with}^C は機器の直接損害費、 FC^I は免震装置の損害費である。 FP_{with} は免震機器供用期間中の機能喪失確率を表わし、非免震機器の場合と同様に(4.8.7)から求める。

2) 評価例

地震 PSA で安全上重要な機器の 1 つとして同定された碍管付き起動変圧器を対象として、機器免震のコストが評価された。その結果、免震構造での期待損害費は、供用期間中での損傷確率が非常に小さいので無視できる。そのため、免震構造化のコストは、間接被害を除いた場合、免震装置費と非免震構造での期待被害費の違いに帰着し、機器免震のコストパフォーマンスが高いことが示されている¹⁶⁾。

4.8.4 まとめ及び確率論的地震動予測地図への期待

(1) まとめ

原子力施設を対象とした地震 PSA における地震ハザードの利用について要約する。

- 1) 原子力施設の PSA は、内的事象（原子力施設内の機器のランダムな故障や運転員の誤操作等に内在する原因によるもの）や、外的事象（地震や航空機墜落等、外部からの衝撃によるもの）を対象として行われ、外的事象 PSA のうちの地震 PSA の 1 タスクとして地震ハザード評価が用いられている。
- 2) 地震 PSA における地震ハザード評価は、任意の 1 サイトを対象として、ローカルな最新情報をできるだけ取り入れ精緻に評価する必要がある。そのために、物理的現象に関する最先端の知見を出来る限り吸収しつつ、不確定性評価を合理的に組み合わせた評価手法を開発してきた。これらの手法は、これまで工学分野で開発されてきた確率論的地震ハザード評価の方法を包含し、かつ地震学・地質学の最新の知見に最も肉迫する内容を備えている。最新の地震ハザード評価手法としては、サイト近傍の強地震動を詳細に評価するために、震源断層モデルを用いた評価を行っている。また、地震ハザードの不確定性評価のために、ロジックツリーを用いた評価も行っている。
- 3) 地震ハザード評価は、構造物・機器のフラジリティー評価のための応答評価用入力地震動の作成にも使用される。そのために、地震ハザードは、最大加速度・速度等のパラメータ表示に加え、一様ハザードスペクトルや地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離としても表示される。これらは、時刻歴波を作成するための目標スペクトルの作成に用いられる。
- 4) 地震ハザードは、更に、強地震動下での複数の機器が同時に損傷する共通原因損傷の誘因となる複数機器の応答の相関評価のための入力地震動の作成にも用いられる。
- 5) 地震ハザードは、地震 PSA の利用の一環として、機器免震性能設計、機器免震技術による地震リスク低減、機器免震コスト評価のために利用されている。機器免震技術は、地震リスク低減策の重要な実用技術の 1 つとして、今後の活用が期待されている。

(2) 確率論的地震動予測地図への期待

我が国の原子力施設を対象とした地震 PSA 手法の開発は、昭和 60 年頃に着手され、20 年程度経過している。地震ハザード評価手法も含めた PSA 手法に対する理解・認識は、これまで必ずしも十分でなかったが、最近非常に高まってきている。このような状況を反映し、内閣府原子力安全委員会の耐震設計審査指針高度化の検討において、耐震安全性評価手法の 1 つとして、地震ハザードも含めた地震 PSA 手法の活用が審議されている。

一方、確率論的地震動予測地図事業の活発な活動や耐震設計分野における性能設計への期待と相まって、地震ハザードへの期待が高まっている。このような動向は、市民の地震ハ

ザードへの認識の向上に繋がり、強いては、原子力分野における地震ハザードへの認識向上にも繋がるとも考えられるので、予測地図の有用性を積極的に発信することが極めて重要と考えられる。

加えて、次の観点の情報を正確に市民に発信することが重要と考えられる。確率論的地震動予測地図では、全国を対象とした平均的な評価を行うのに対し、原子力サイトの地震ハザード評価では、任意の 1 地点を対象とした精緻な評価を行う。このように両者は、対象領域及び評価精度に対する要求内容が異なる。そのために、評価結果の公開に当たっては、評価条件等を明確にし、誤解を与えないように丁寧な説明が重要と考えられる。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会:安全目標案に関する調査審議状況の中間とりまとめ、安全目標専門部会、平成 15 年 12 月。
- 2) 堤英明・蛭沢勝三・山田博幸・柴田勝之・藤本滋:確率論的手法による機器免震性能設計及び有効性評価手法、JCOSSAR2003 論文集、F2-05、pp.829-836,2003.
- 3) 蛭沢勝三・神野邦彦・中村英孝・伊東守・阿部清治:建屋及び機器の現実的応答評価法と応用、日本原子力研究所報告書、JAERI-Research96-059、1996.
- 4) 亀田弘行・石川裕:ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析への拡張、土木学会論文集、No.392/I-9、pp.395-402(1988).
- 5) Robin K McGuire: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquake Closing the Loop, Bulletin of Seismological Society of America Vol.85 No.5 (October 1995).
- 6) 原子力発電技術機構:13 年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備(その2)に関する報告書—地震ハザードの試解析—、INS/M00-16、平成 11 年 3.
- 7) K.Ebisawa et al.; Evaluation of response factors for seismic probabilistic safety assessment of nuclear power plants, Nuclear Engineering and Design, Vol.147, 1994.
- 8) K.Ebisawa and T.Uga: Evaluation methodology for seismic base isolation of nuclear equipments, Nuclear Engineering and Design, Vol.142,1993.
- 9) 蛭沢勝三・山本幹夫・本橋章平・坂上正治:地震動下での機器損傷評価における応答の相関係数評価手法の整備、日本原子力学会「2004 秋の大会」、2004 年 9 月。
- 10) 日本原子力研究所リスク評価解析研究室:軽水炉モデルプラント地震 PSA 報告書、JAERI-Research 99-035、1999 年。
- 11) 独立行政法人原子力安全基盤機構:13 年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備(その2)に関する報告書—地震ハザードの試解析—、INS/M00-16、平成 11 年 3.
- 12) 蛭沢勝三:機器免震の有効性評価法と評価コード EBISA, RIST ニュース、No. 20、1994.
- 13) K.Ebisawa et al.: Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components, Nuclear Engineering and Design, Vol.198,2000.

- 14) H.Tsutsumi,etal.:Dynamic Response of Base Isolation Test System for Nuclear Component under Natural Seismic Motion, Presented at the 2000 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol. 402-1 Seismic Engineering-2000-, Vol.1, pp141-146, Seattle, 2000.
- 15) 堤英明他:3次元機器免震試験システムの動的挙動および免震効果、第2回免震制振コロキウム、2000年11月.
- 16) 蛭沢勝三:機器免震の経済性評価法とその応用, JCOSSAR'95、1995.