

7.3.1	基本事項	96
7.3.2	事故シーケンスのモデル化の手順	97
7.3.2.1	安全機能の設定	97
7.3.2.2	成功基準の設定	98
7.3.2.3	イベントツリーの作成	99
7.4	システムのモデル化	101
7.4.1	基本事項	101
7.4.2	システムのモデル化に関する手順・留意事項	101
7.4.2.1	モデル化の前提条件の設定	101
7.4.2.2	基事象のスクリーニング	102
7.4.2.3	フォールトツリーの頂上事象の設定	102
7.4.2.4	フォールトツリーの作成	102
7.5	事故シーケンスの定量化	105
7.5.1	炉心損傷頻度の算出	105
7.5.2	事故シーケンスの条件付き発生確率の評価	106
7.5.3	感度解析	108
7.5.4	不確実さ評価	109
7.5.5	重要度解析	110
7.5.6	損傷の相関の取扱い	111
7.6	格納容器機能喪失シナリオの分析	111
7.6.1	格納容器機能喪失に至る事故シナリオの分析	111
7.6.2	格納容器破損事故シーケンスの分析	112
8.	報告書のとりまとめ	114
8.1	報告書の作成方針	114
8.2	報告書の記載項目	114
附属書 1 (規定)	地震 PSA の妥当性を確保するための方策	115
附属書 2 (規定)	原子炉施設周辺斜面の崩壊による炉心損傷への影響評価	117
附属書 3 (規定)	余震による炉心損傷への影響評価	117
附属書 4 (規定)	経年変化事象を考慮した場合の炉心損傷への影響評価	118
附属書 5 (規定)	建屋の現実的耐力の評価方法	120
附属書 6 (規定)	屋外重要土木構造物の現実的耐力の評価方法	121
附属書 7 (規定)	地盤剛性の標準的なデータベース	125
附属書 8 (規定)	建屋減衰定数の標準的なデータベース	125
附属書 9 (規定)	コンクリート実強度の標準的なデータベース	127

5.3.4	領域震源モデルのパラメータの設定	36
5.4	地震動伝播モデルの設定	42
5.4.1	地震動伝播モデルの選択	42
5.4.2	距離減衰式を用いる方法におけるパラメータの設定	43
5.4.3	断層モデルを用いる方法におけるパラメータの設定	44
5.4.4	ロジックツリーの分岐として考慮する項目の設定	44
5.5	ロジックツリーの作成	45
5.5.1	ロジックツリーで考慮すべき不確かさ要因の選定	45
5.5.2	ロジックツリー作成における技術的難易度及び専門家活用水準の設定	46
5.5.3	専門家活用水準ごとのロジックツリー作成手順	46
5.5.4	TI, TFI, 専門家の選定基準	48
5.6	地震ハザードの評価	49
5.6.1	炉心損傷頻度評価のための地震ハザード評価	49
5.6.2	フラジリティ評価用地震動作成のための地震ハザード評価	51
5.7	フラジリティ評価用地震動作成	54
5.7.1	地震動強さの設定	54
5.7.2	地震動作成手法の選択	55
5.7.3	目標スペクトルの設定	55
5.7.4	時刻歴波形の作成	56
5.7.5	免震型原子力発電施設を対象とする場合の留意事項	58
6.	建屋・機器フラジリティ評価	59
6.1	建屋・機器フラジリティ評価の流れ	59
6.2	評価対象と損傷モードの設定	61
6.2.1	評価対象物の選定	61
6.2.2	損傷モード及び部位の抽出	61
6.2.3	損傷評価の指標の選定	63
6.2.4	機器カテゴリの作成及びカテゴリごとの現実的耐力評価	64
6.2.5	不確かさ要因の分析	65
6.3	評価手法の選択	66
6.4	現実的耐力の評価	67
6.4.1	現実的耐力評価における基本事項	67
6.4.2	現実的耐力の評価方法	68
6.4.2.1	建物・構築物	68
6.4.2.2	機器・配管系	69
6.4.2.3	地盤	69
6.5	現実的応答の評価	70

解説 53	一様ハザードスペクトルの評価の例	285
解説 54	地震ハザードの再分解によるマグニチュード・距離の作成手法	289
解説 55	地震ハザードの再分解によるマグニチュード・距離の評価の例	290
解説 56	周期特性の設定	292
解説 57	時刻歴波形の作成手順	295
解説 58	ターゲットスペクトルに適合した模擬地震波の作成例	298
解説 59	2価減衰スペクトルに適合させた模擬地震波の作成例	301
解説 60	群遅延位相モデルを用いた模擬地震波の作成例	304
解説 61	確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定例	309
解説 62	フラジリティ曲線の算定の概要	313
解説 63	対数正規分布の仮定に対する考え方	315
解説 64	フラジリティ評価で対象とする設備の例	316
解説 65	耐力値の評価におけるスクリーニング基準の検討例	319
解説 66	建屋の損傷シナリオを構成する損傷モードの例	320
解説 67	建屋フラジリティ評価における上下動の取扱い	321
解説 68	機器の損傷モードの例	322
解説 69	配管系の評価対象部位の選定例	326
解説 70	建物・構築物に対する損傷評価指標の選定に関する補足事項	327
解説 71	地震動強さの指標の選定に関する補足事項	327
解説 72	機器カテゴリ分類の例	327
解説 73	一般的な不確かさ要因	329
解説 74	建物・構築物及び地盤などの不確かさ要因の例	329
解説 75	機器・配管系の不確かさ要因の例	333
解説 76	フラジリティ評価手法の特徴	337
解説 77	フラジリティ評価手法における中央値及び標準偏差に関する留意事項	337
解説 78	評価対象ごとの現実的耐力及び現実的応答の中央値及び 標準偏差の一般的傾向	338
解説 79	不確かさ伝播解析手法の選定	339
解説 80	機器材料の限界強度データに基づく現実的耐力の中央値の設定例	342
解説 81	機器の材料強度に関するデータベース	343
解説 82	炉心支持構造物の現実的耐力の中央値の設定例	343
解説 83	機器・配管系のアンカ一部の現実的耐力評価の考え方	344
解説 84	動的機能限界試験データの例 (1)	344
解説 85	動的機能限界試験データの例 (2)	345
解説 86	機器種別の機能確認加振試験に関するデータ	345
解説 87	機能確認済加速度を用いた動的機器の現実的耐力の評価手法	347

解説 88	加振試験に関するデータベース	347
解説 89	サブ応答係数における上下入力地震動の考え方	349
解説 90	屋外重要土木構造物の地震応答解析手法の適用について	349
解説 91	原子炉建屋の現実的応答評価における不確実さパラメータの設定	351
解説 92	屋外重要土木構造物の現実的応答評価における不確実さ パラメータの設定	351
解説 93	現実的応答評価における不確実さ解析手法の精度	351
解説 94	建物・構築物におけるサブ応答係数の例	353
解説 95	機器におけるサブ応答係数の例	357
解説 96	機器種別ごとの減衰定数に関するデータベース	361
解説 97	モーダル係数に係るサブ応答係数の評価例	363
解説 98	モード合成に係わるサブ応答係数の評価例	365
解説 99	現実的応答関連のデータベース	366
解説 100	塑性エネルギー吸収係数の概要と評価例	367
解説 101	フラジリティ曲線の算定例の一覧	375
解説 102	原子炉建屋のフラジリティ評価例	377
解説 103	BWR 原子炉建屋フラジリティ評価における不確実さの試算例	386
解説 104	屋外重要土木構造物・取水ピットのフラジリティ評価例	391
解説 105	屋外土木構造物・海水管ダクトのフラジリティ評価例	396
解説 106	地中 RC 構造物の損傷確率評価例	398
解説 107	現実的耐力と現実的応答による方法を用いた 機器・配管系のフラジリティ評価例	401
解説 108	地震動による原子炉格納容器の耐圧機能の低下の考え方について	471
解説 109	斜面のせん断抵抗力に基づく損傷確率評価例	471
解説 110	斜面のすべり安全率に基づく損傷確率評価例	474
解説 111	原子力発電施設の基礎地盤の年損傷確率評価例	478
解説 112	現実的耐力と応答係数による方法	481
解説 113	現実的耐力と応答係数による方法を用いた BWR 原子炉建屋のフラジリティ評価の例	484
解説 114	現実的耐力と応答係数による方法を用いた屋外重要土木構造物 ・海水管ダクトのフラジリティ評価の例	491
解説 115	現実的耐力と応答係数による方法を用いた機器の フラジリティ評価例	497
解説 116	耐力係数と応答係数による方法	512
解説 117	耐力係数と応答係数による方法における上下動の考え方	517
解説 118	耐力係数と応答係数による方法を用いた建屋フラジリティ	

**【解説 32】断層モデルによる地震動評価**

a) **評価手法の概要** 近年の解析技術や各種地下構造調査法の進歩によって、地震動の基本的 3 要素である震源・伝播・サイト増幅の各特性を一括して直接的に考慮することができる、断層モデルを用いた地震動評価が可能となっている。これらの成果を活用すべく、地震ハザード評価においても断層モデルを用いた地震動評価手法の活用が積極的に進められている。

断層モデルを用いた地震動評価手法は、多くの研究者によって様々な手法が提案されている。活用に当たっては、断層面と評価サイト周辺の地下構造に関して距離減衰式よりも詳細な情報が必要となるとともに、多くの計算時間を要することに留意する必要がある。

断層モデルによる地震動の評価は、**解説 32 図 1** に示すように、震源特性、伝播特性及びサイトの地盤増幅特性（サイト特性）をそれぞれ個別に評価することが可能で、パラメータが精度良く与えられた場合、距離減衰式に比べて精度良く地震動を推定することができると言われている。

断層モデルによる地震動評価方法には、理論的方法、半経験的波形合成法（経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法の 2 種類の方法がある）、及び両者の特徴を生かしたハイブリッド法がある。

理論的方法は、周期約 5 秒程度以上の長周期領域の地震動を理論的に推定するのに適した方法と言われているが、短周期領域の地震動に関しては、対応する周期帯で十分な震源のモデルができないこと、ならびに波動伝播経路の微細な構造に強く影響されることなどから、評価は困難である。

一方、経験的グリーン関数法は、発震機構や波動伝播経路が大地震と共通する中小地震の観測波形をグリーン関数として考え、それを断層の破壊過程に合わせて重ね合わせることによって大地震の地震動を評価する方法である。

また、統計的グリーン関数法は、他地点で得られた多数の観測波形を統計処理して求めたスペクトルと経時特性を用いて作成した模擬地震波を要素地震波とし、経験的グリーン関数法と同じく断層の破壊過程に合わせて重ね合わせることによって大地震の地震動を評価し、サイトの地盤特性を考慮して対象地盤の地震動を評価する方法である。

これらの方法では、いずれも震源での地震波のスペクトル特性（震源スペクトル特性）を加速度フーリエスペクトル上で一定とするいわゆる  $\omega^2$  乗モデルの仮定を導入することによって、理論的な方法によっては実現できない短周期地震動の評価をある程度できるようにしている。

b) **断層モデルによる地震動評価手順** 断層モデルによる地震動評価では、特定震源モデルを対象とし、断層パラメータの不確かさを考慮して地震動を求め、地震ハザード評価に必要な地震動強さの確率分布を求める。

パラメータの設定では、まず、断層モデルを用いる手法で評価する地震に対して、断層の破壊領域を設定し、断層破壊過程の検討、要素地震の検討を行う。断層モデルの検討で

さは、対数標準偏差として表される。現実的耐力及び現実的応答の評価における、偶然的  
不確実さ要因と認識論的不確実さ要因の関係を**解説 62 表 1**に示す。

**解説 62 表 1 現実的耐力及び現実的応答評価における不確実さ要因の一覧**

	不確実さ要因		組み合わせ (添字：C)
	偶然的な不確実さ要因 (添字：r)	認識論的不確実さ要因 (添字：u)	
現実的耐力 (添字：S)	$\beta_{S^r}$	$\beta_{S^u}$	$c\beta_S$
現実的応答 (添字：R)	$\beta_{R^r}$	$\beta_{R^u}$	$c\beta_R$
組み合わせ (添字：C)	$c\beta^r$	$c\beta^u$	$c\beta$

現実的耐力の対数標準偏差  $c\beta_S$  は、偶然的な不確実さ要因を表す対数標準偏差  $\beta_{S^r}$  と認  
識論的不確実さ要因  $\beta_{S^u}$  を用いて、次式で表される。

$$c\beta_S = \sqrt{(\beta_{S^r})^2 + (\beta_{S^u})^2} \quad \text{(解 62-3)}$$

同様に、現実的耐力の対数標準偏差  $c\beta_R$  も、偶然的な不確実さ要因を表す対数標準偏差  $\beta_{R^r}$   
と認識論的不確実さ要因  $\beta_{R^u}$  を用いて、次式で表される。

$$c\beta_R = \sqrt{(\beta_{R^r})^2 + (\beta_{R^u})^2} \quad \text{(解 62-4)}$$

一方、 $F(\alpha)$  を表す **(解 62-2)** 式は、不確実さ要因を考慮して、次式で表される。

$$F(A) = \Phi\left(\frac{\ln(A) - \ln(\tilde{A}m \cdot e^{-c\beta^u \cdot X})}{c\beta^r}\right) \text{ 又は } \Phi\left(\frac{\ln(A) - \ln(\tilde{A}m) + c\beta^u \cdot X}{c\beta^r}\right)$$

**(解 62-5)**

また、 $c\beta^r$  は偶然的な不確実さ要因の対数標準偏差、 $c\beta^u$  は認識論的不確実さ要因の対数  
標準偏差を表し、 $X$  はフラジリティ曲線の信頼度  $p$  に対応する標準正規確率変量  
( $= \Phi^{-1}(p)$ ) を表す。ここで、 $c\beta^r$  及び  $c\beta^u$  は次のように表される。

$$c\beta^r = \sqrt{(\beta_{S^r})^2 + (\beta_{R^r})^2} \quad \text{(解 62-6)}$$

$$c\beta^u = \sqrt{(\beta_{S^u})^2 + (\beta_{R^u})^2} \quad \text{(解 62-7)}$$

また、 $X$  を例示する。

$$p=5\% \text{ 信頼度のとき } X=-1.65$$

$$p=50\% \text{ 信頼度のとき } X=0$$

$$p=95\% \text{ 信頼度のとき } X=1.65$$

$p$  が 5, 50, 95% のときのフラジリティ曲線を **解説 62 図 2** に示す。図において、 $c\beta$  はフ  
ラジリティ曲線の傾きに寄与し、 $c\beta^u$  はフラジリティ曲線の信頼度の幅に寄与する。

一方、**(解 62-5)** 式によるフラジリティ曲線は信頼度に応じた曲線を示しているが、その  
平均的な曲線は  $c\beta^r$  と  $c\beta^u$  の二乗和平方根  $c\beta$  を用いた **(解 62-8)** 式で表される。

ユニバーサルブラケットピン部損傷、ブラケットと支持体との接続部損傷、  
ベアリング押さえ六角ボルト損傷、ユニバーサルボックス損傷アイボルトイヤー  
ピン部損傷、ベアリングナット損傷

- ・ 配管サポート（レストレインと及びアンカ）  
サポート部材と支持体（または埋め込み板）との溶接部損傷、サポート部材同士  
の溶接部損傷、Uプレート母材損傷、Uプレートとサポート部材との溶接部損傷、  
アンカーの中央プレートとサポート部材との溶接部損傷

上記は、想定される損傷モードを列記したものであるが、耐震設計では、当然上記損傷  
モードを考慮した許容値の設定、評価がなされている。そのため、フラジリティ評価では、  
耐震設計の評価結果や試験・解析による裕度評価結果に基づき行うことになる。

配管系は長尺構造物であることから、他の設備に比べて上下方向地震動の影響を受ける  
可能性が大きい。このため、配管系の損傷モードの選定に当たっては、水平地震動と同様  
に上下地震動の影響にも着目して選定する必要がある。

なお、配管系は多数の系統から構成されているので、それらの応答、耐力は配管系ごと  
に相違する。そのため、配管系の地震時損傷確率の算定に当たっては、系統ごとに求める  
ことを原則とする。ただし、その評価の妥当性、保守性を明らかにした上で、系統をまと  
めてひとつの配管系で代表してもよい。

**f) 横形容器及び熱交換器** 横形容器及び熱交換器本体は圧力バウンダリであり、作用荷  
重としては熱や内圧などの通常運転時荷重が支配的となるため、地震時損傷モードとして  
着目すべきものとしては基礎ボルト部と支持脚部が挙げられる。

基礎ボルト部に関しては、その損傷によってタンク又は熱交換器の構造的損傷に結びつ  
く可能性がある。支持脚部に関しては、その損傷によってタンク又は熱交換器の構造的損  
傷や、圧力バウンダリの機能が損なわれる可能性がある。

**g) たて形容器及び熱交換器** たて形容器及び熱交換器の地震時損傷モードとして着目す  
べきものとしては座屈、基礎ボルト及び支持脚損傷が挙げられる。

これらの損傷に伴いタンク又は熱交換器の構造的損傷に結びつき、圧力バウンダリの機  
能が損なわれる可能性がある。

**h) 平底タンク** 平底タンクの損傷モードとしては、胴板の座屈及び基礎ボルトの損傷が  
挙げられる。

**i) 空調ユニット** 空調ユニットの構造的破損モードとしては、基礎ボルトの損傷が挙げ  
られる。また、機能的損傷モードとしてはファンブレードやロータモータなどの接触、固  
着などが挙げられる。

**j) ダクト** ダクトの損傷モードとしては構造的損傷であり、ダクト本体の座屈、サポー  
ト部の損傷が挙げられる。ダクトは長尺構造物であることから、他の設備に比べて上下地  
震動の影響を受ける可能性が高い。このため、ダクトの損傷モードの選定に当たっては、  
水平地震動と同様に上下地震動の影響にも着目して選定する必要がある。

損傷限界点に関する実験データを例として分析する。実験データのばらつきを偶然的不確実さ要因及び認識論的不確実さ要因に大別すると、損傷限界点を解析的に求める場合には、コンクリート強度などの材料物性値のばらつきを偶然的不確実さ要因とし、評価方法に係わる誤差を認識論的不確実さ要因として考慮する。

**74.2 現実的応答評価に含まれる不確実さ要因** 建物・構築物の現実的応答評価では、①解放基盤表面における地震動の評価、②建物・構築物への入力地震動の評価、③建物・構築物の地震応答評価の各手順における設計上の保守性及び不確実さを含んでいると考えられる。以下では上記の各手順において、不確実さの大きな要因の例を挙げる。ただし、これらの要因のうちで、感度解析などによって他の要因と比べてフラジリティ評価に与える影響が小さいことが確認されているもの、及び、各評価過程でのモデル化に関する不確実さについて、地震観測記録を用いたシミュレーション解析などで評価方法の妥当性、つまり評価誤差が小さいことが確認されているものについては、不確実さ要因として考慮しなくてもよい。

**a) 解放基盤表面における地震動の評価において考慮すべき不確実さ要因** 解放基盤表面における地震動の評価において考慮すべき不確実さ要因としては、周期特性、位相特性及び経時特性の評価に係る不確実さが挙げられる。ここでは、**本体 5.7**のフラジリティ評価用地震動の作成の内容を対象として取上げる。偶然的な不確実さ要因としては、基本的に地震ハザード評価に含まれているものとして取扱う。一方、認識論的不確実さ要因として、解放基盤表面位置や周期特性、位相特性及び経時特性の評価法の誤差が考えられる。また、目標スペクトル形状を設定することに伴う誤差も認識論的不確実さ要因として挙げられる。

**b) 建物・構築物への入力地震動の評価において考慮すべき不確実さ要因** 建物・構築物への入力地震動の評価において考慮すべき不確実さ要因としては、解放基盤表面位置と建物・構築物の基礎底面位置が顕著に異なっている場合、解放基盤表面位置から建物・構築物の基礎底面位置までの地震動の地盤伝播問題や、建物・構築物基礎に実際に入力される地震動の評価に係る不確実さが挙げられる。それらのうち、偶然的な不確実さに係る主な要因としては、せん断波速度などの地盤物性値の不確実さが挙げられる。また、認識論的不確実さの主な要因として、地震動伝播の評価手法、成層地盤モデル化、地震動の地下逸散モデル化、及び地盤の非線形性のモデル化における誤差が挙げられる。

**c) 建物・構築物の地震応答評価において考慮すべき不確実さ要因** 建物・構築物の地震応答評価において考慮すべき不確実さ要因としては、建物・構築物振動モデルの評価、地盤－建物・構築物動的相互作用モデルの評価及び解析手法に係る不確実さが挙げられる。それらのうち、偶然的な不確実さの要因としては、せん断波速度などの地盤物性値やコンクリート強度・鉄筋強度などの構造材料物性値及び建物・構築物の減衰定数の不確実さが挙げられる。また、認識論的不確実さの要因としては、材料又は部材の非線形特性を含む建



が挙げられる。

機器応答評価用入力動の不確かさは建物・構築物の応答の不確かさの結果として現れるものであることから、この不確かさは建物・構築物の現実的応答の不確かさとして別途評価されるため、機器応答評価用入力動については中央値のみを評価すればよい。

なお、機器応答評価用入力動の不確かさとして、評価対象物の固有振動数の不確かさに起因する応答の不確かさ（床応答スペクトルを用いた場合）が考えられるが、このような固有振動数の不確かさは解析モデルの不確かさとして評価可能である。

**b) 減衰** 設計評価では、機器応答評価に用いる減衰定数は安全側の確定値を用いるが、現実的応答評価では、不確かさ要因として現実的な減衰定数（中央値及びばらつき）を考慮する。減衰定数の不確かさは、偶然的な不確かさ及び認識論的不確かさの両者を有していると考えられる。

**c) 解析モデル** 機器応答評価に用いる解析モデルに関する主な不確かさ要因としては、解析モデルの諸元（ヤング率などの構造材料物性値・断面係数などの断面性能・重量など）、解析モデル形状（モデル化手法）、が挙げられる。

構造材料物性値は、主に金属材料に関する物性値であり、一般に現実的な値が使用され、他の不確かさ要因に比べ不確かさは小さいと考えられる。断面性能については、加工精度などに起因する実機と評価で使用している数値との差異が不確かさとして考えられるが、構造材料物性値と同様に他の不確かさ要因に比べ不確かさは小さいと考えられる。また、重量については、現実的値又は保守的な値が用いられる。保守的な値とは、固有振動数が柔側となり応答が保守的（大きく）となるよう設定されている場合を意味するが、現実的な重量を用いた応答評価を行うことが合理的でない場合は、重量に関する保守性を安全側に無視し、本不確かさ要因は考慮しないことがある。

解析モデル形状に関し、1質点系でモデル化される機器については、一般に不確かさは小さいが、上記のように重量が保守的に設定されていることが多いため、必要に応じてその影響を不確かさ要因として考慮することができる。多質点系やFEMなどでモデル化される機器については、1質点系よりも合理的なモデル化がされることが多いため、モデル形状や諸元の保守性や不確かさによる影響が大きくなる傾向にあるため、現実的応答の評価においては注意が必要である。

**d) モード合成法** 機器の応答解析手法に関し、現実的な応答を与える直接積分による時刻歴解析や加振試験に対して、モーダル解析は基本的にこれらと同等の結果が得られるが、モード合成法（一般に二乗和平方根法）に起因するばらつきが含まれる。また、モーダル解析では、ある程度以上の高次の振動モードは応答に影響しないとして解析上考慮しないことが一般的であるため、省略した高次の振動モードに起因する応答の不確かさが考えられる。

**e) 非線形応答** 機器の非線形応答に関する不確かさは、機器の線形応答解析結果から非線形応答効果を簡易的に評価しようとするために生じるものであり、認識論的不確かさに

略法の検討”，日本建築学会大会学術講演梗概集，1994.9

**【解説 94】 建物・構築物におけるサブ応答係数の例** 建物・構築物の設計応答評価に係る保守性の要因としては，①解放基盤表面の地震動の評価，②建物・構築物への入力動の評価，及び③建物・構築物の地震応答評価に係るものがあり，これらを応答係数の係数化の対象とし，それぞれの応答係数を  $F_1$ ， $F_2$ ， $F_3$  として表す。定量評価に当たっては，上記保守性の要因をさらに細分化したサブ応答係数を評価する。これらの評価手法の例を示す。

- ① 解放基盤表面の地震動の評価  $F_1$ 
  - ・地震動の周期特性，位相特性及び経時特性
- ② 建物・構築物への入力地震動の評価  $F_2$ 
  - ・解放基盤表面から建物・構築物基礎への伝播過程における地盤モデル
  - ・基礎の拘束効果による入力損失
- ③ 建物・構築物の地震応答評価  $F_3$ 
  - ・建物・構築物振動モデル
  - ・地盤－建物・構築物連成系モデル
  - ・地震応答解析手法

**a) 解放基盤表面における地震動の評価  $F_1$**

1) **保守要因の内容** 解放基盤表面における地震動の評価において，設計上の保守性及び不確実さを与える主要な要因として，地震動の周期特性（スペクトル特性）を考慮し，解放基盤表面における地震動に係わるサブ応答係数  $F_{ss}$  として評価する。

2) **中央値の評価**  $F_{ss}$  の中央値は，設計時の周期特性による応答と現実的な周期特性の中央値による応答から次式で評価する。

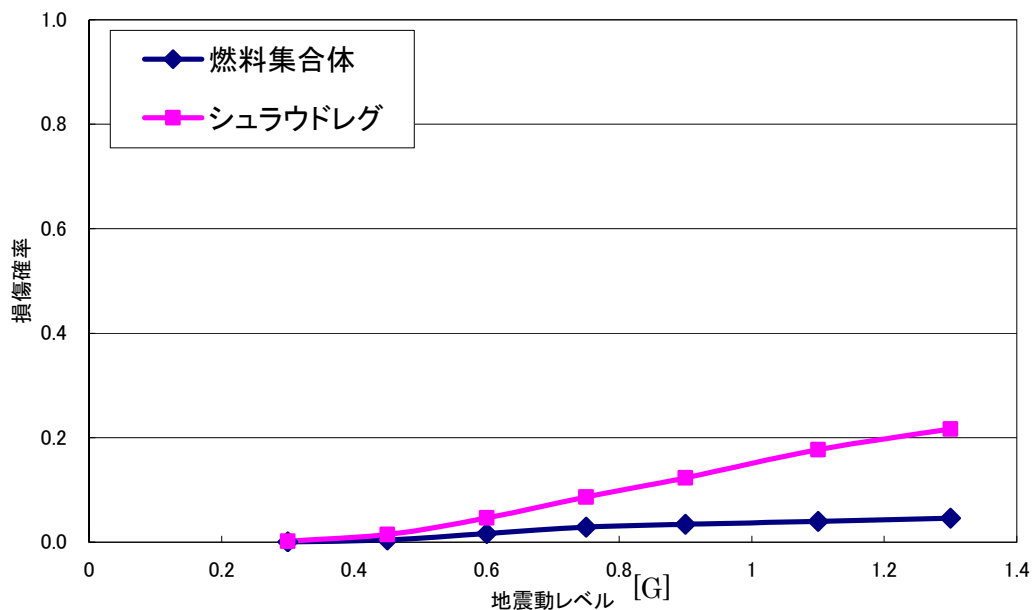
$$F_{ss} \text{の中央値} = \frac{\text{設計評価時の周期特性による応答}}{\text{現実的な周期特性の中央値による応答}} \quad (\text{解 94-1})$$

なお，解放基盤表面における fragility 評価用地震動の現実的な周期特性の中央値として，**本体 5.7.3** に示す周期特性を用いることができる。

3) **標準偏差の評価**  $F_{ss}$  の認識論的不確実さ（標準偏差）として，**本体 5.7.3** に示す fragility 評価用地震動の周期特性に係る認識論的不確実さ（標準偏差）を考慮する。ただし，評価対象物の現実的応答評価に支配的な周期範囲において，**本体 5.5** に示すロジックツリーより求まる信頼度ごとのスペクトル形状がほぼ相似であるとみなせる場合には， $F_{ss}$  の認識論的不確実さ（標準偏差）は考慮しなくてもよい。

**b) 建物・構築物への入力地震動の評価  $F_2$**  建物・構築物の入力地震動の評価における設計上の保守性及び不確実さの要因としては，地盤モデルと建屋基礎の拘束効果による入力損失モデルに係るものがある。

**1) 地盤モデル**



解説 107 図 17 BWR 炉内構造物のフラジリティ曲線

【参考文献】

解説 107-1) (財) 原子力発電技術機構, 原子力安全解析所, “平成 12 年度地震に係る確率論的安全評価手法の整備に関する報告書=機器のフラジリティデータ整備=”, INS/M00-18, 平成 13 年 3 月

107.9.5 地震スクラムを考慮した場合の制御棒挿入性に関する損傷確率の評価例 制御棒挿入性の評価に当たっては, 現状では燃料集合体の地震時最大応答発生時に制御棒を挿入することを考えてフラジリティ評価を行っている。

ここで, 地震動は, 地震波到達時は振幅が小さいが, 徐々に振幅が大きくなり, やがて最大振幅に達するのが一般的である。また, 国内の原子力発電所には, 地震加速度が設定値を超えると原子炉保護系の作動によって原子炉がスクラムする設備 (地震感知装置) が設置されており, 地震応答がスクラム設定値に達した段階で制御棒が挿入される。

このため, 制御棒は地震応答の最大値に達する前に要求される機能を達成することが可能であり, 実際の損傷確率は最大地震応答をベースとした場合よりも小さいものと考えられる。ここでは, 地震波形及びスクラム設定値を仮定し, 地震感知装置の効果を考慮した場合の制御棒地震時損傷確率 (制御棒に要求される機能喪失確率) の改善度について試算を行った。

試算の結果, 地震感知装置を考慮した場合の制御棒の地震時損傷確率は大幅に低減し, 地震 PSA において地震感知装置の効果を考慮することの有効性を確認した。

なお、地震感知装置の効果は地震波形に依存するため、実機評価で考慮する場合には、当該サイトに発生する地震波形についての検討が必要である。

**a) 検討条件** 本検討は、地震 PSA において、地震感知装置の効果を検討することの有効性を確認するための試算であることから、解析条件は想定或いは仮定した。

**1) 地震動波形の包絡形** 地震動波形の包絡形は Jennings タイプであるもの仮定し、立上り部の時間及び包絡関数は下式より求める。

$$\text{包絡式 } E(t) = (t / t_b)^2 \quad (\text{解 107-18})$$

$$\text{時間 } t_b = 100.5M - 2.93$$

**解説 107 図 18** に地震動波形の包絡形の概念図を示す。

**2) 検討対象とする地震動マグニチュード** M8.2 を想定する。

**3) スクラム設定値** 実機では S 1 地震動の応答をベースにスクラム設定値を設定するが、本検討では 150Gal がスクラム設定値であったと仮定する。

**4) 制御棒挿入時間** これは、制御棒のスクラム時間と計測系時間遅れなどを考慮して設定し、4.0 秒とする。

**5) 損傷確率の算定に用いる地震動加速度** 制御棒の損傷確率を求めるにあたり、制御棒の地震応答はスクラム開始時刻から 4.0 秒後（制御棒挿入終了時刻）の値を用いた。

これは、1) の仮定によって、制御棒の応答はスクラム開始<スクラム完了であるため、本検討では制御棒の応答が最も大きくなるスクラム完了時刻での制御棒応答を損傷確率算出地震応答とした。

**6) 制御棒地震時損傷確率の算定条件** 制御棒の地震時損傷確率を試算するにあたり、下記の条件を仮定する。

耐力中央値 : 6.9G

耐力の対数標準偏差 :  $\beta_R = \beta_U = 0.09$

応答中央値 : 2.0G（解放基盤面で 450Gal 入力時）とし、線形応答を仮定する。なお、解放基盤面での値を 450Gal としたのは今回の検討のための仮定値である。

応答の対数標準偏差 :  $\beta_R = 0.3, \beta_U = 0.25$

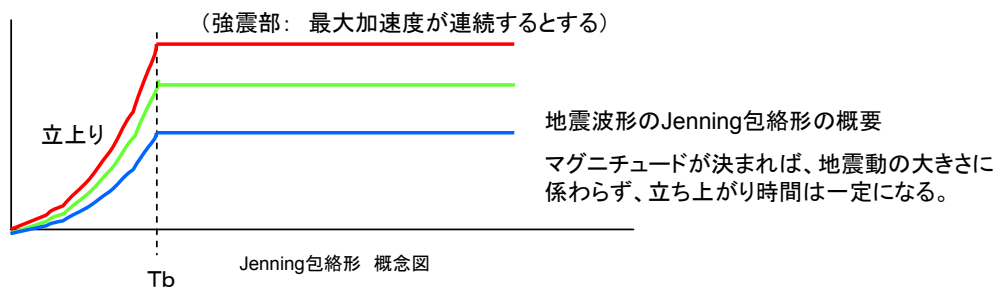
**b) 制御棒地震時損傷確率の試算**

**1) スクラムと地震動レベルの関係** **解説 107 図 19** にスクラムと地震動レベルの関係を示す。今回の検討条件では、地震動の立上り部である 6 秒前後でスクラムが開始され、強震領域に入る前の 10 秒前後にはスクラムが完了している。このため、強震領域で損傷確率を求める現行の考え方に比較して、今回の考え方を採用した地震時損傷確率は改善できることが確認できる。

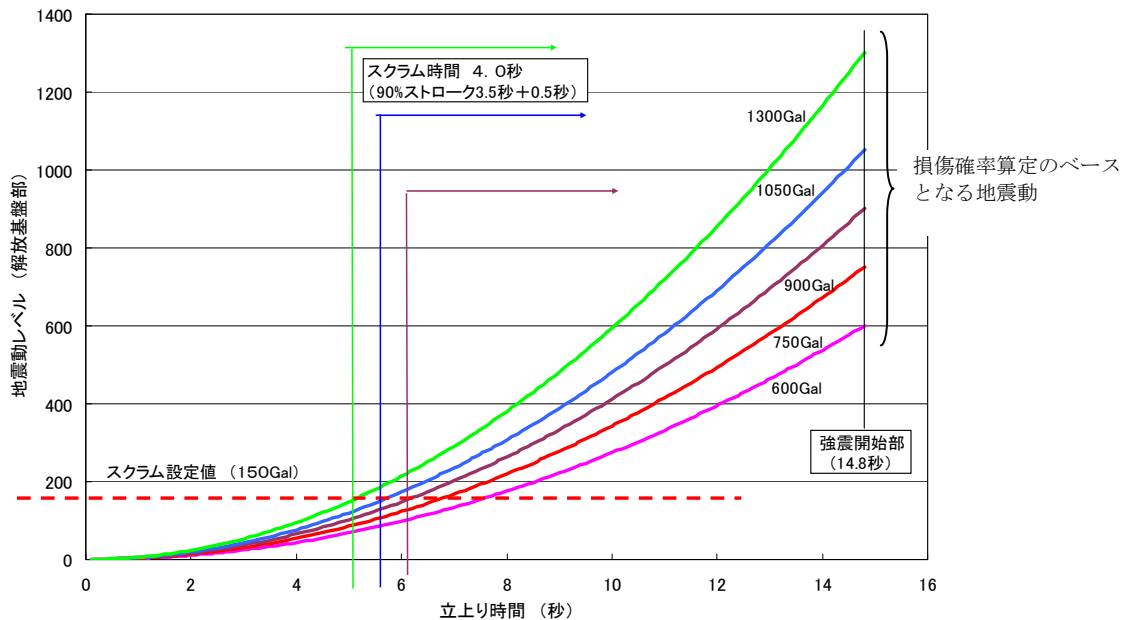
**2) 制御棒の損傷確率（機能喪失確率）の試算** **解説 107 図 20** に地震感知装置を考慮した場合と考慮しない場合での制御棒の地震時損傷確率を示す。本検討結果から、地震感知装置の効果を検討することによって、制御棒の地震時損傷確率を改善できる見通

しを得ることができた。

**c) 検討課題** 本検討では、地震動が立上り部を有して徐々に増加し強震領域に至る地震波形を仮定し、さらにこの立上り部でスクラムすることとしたために地震感知装置の効果が顕著に得られた。ここで、立上り部を有さず、地震発生後に強震がすぐに開始するような地震動を考えた場合には、地震感知装置の効果は少なく、制御棒の地震損傷確率も現行と同など程度となる。従って、本考え方を実機に適用するに当っては、実機サイトに発生する地震波形を調査検討した上で、今回の考え方の適用の可否判断を行うことが必要である。



解説 107 図 18 地震動波形の包絡形



解説 107 図 19 スクラムと地震動レベルの関係

② **建物・構築物の剛性に関するサブ応答係数** 本係数は、設計評価での剛性における保守性及び不確実さに係るものである。建屋の設計固有周期での建屋応答スペクトル  $S_a$  値と現実的固有周期の中央値での  $S_a$  値との比として、次式で評価した。

$$F_M = \frac{S_a(\text{設計固有周期})}{S_a(\text{現実的固有周期})} = \frac{1.13}{1.10} = 1.03$$

また、現実的建屋物性値のばらつきに応じた現実的固有周期のばらつきを評価し、この現実的固有周期のばらつきに対応した建屋応答値のばらつきを2点推定法によって評価し、 $\beta_R$ として求めた。

$$\beta_R = 0.07$$

解析モデル化に関する認識論的不確実さについて、Kennedy の評価例<sup>解説 119-1</sup>を参考に、 $\beta_U$ を次の通りとした。

$$\beta_U = 0.15$$

③ **減衰定数に関するサブ応答係数  $F_{\delta}$**  本係数は、建屋の減衰定数の設定における保守性及び不確実さに係るものである。建屋の設計用減衰定数5%に対する設計応答と、現実的減衰定数の中央値4.85%における応答値との比として、次式によって評価した。

$$F_{\delta} = \frac{S_a(\text{減衰設計値}5.0\%)}{S_a(\text{減衰中央値}4.85\%)} = \frac{1.32}{1.33} = 0.99 \quad (\text{解 119-5})$$

本係数の  $\beta_R$  は、現実的減衰定数（対数標準偏差  $\beta : 0.25$ ）の中央値4.85%と、その中央値  $\times \exp(-\beta)$  に相当する減衰定数3.78%それぞれの建屋応答値の比として、次式によって評価した。

$$\beta_R = \ln \frac{S_a(\text{減衰} - \beta \text{値}3.78\%)}{S_a(\text{減衰中央値}4.85\%)} = \ln \frac{1.42}{1.33} = 0.07 \quad (\text{解 119-6})$$

$\beta_U$  を考慮せず、0とした。

3.2) **非線形応答に関するサブ応答係数  $F_{NL}$**  本係数は、応答係数法的前提である建屋の線形応答に関する建屋の非線形応答の補正に係るものである。

建屋の非線形応答によって、建屋への入力加速度レベルによっては、線形応答時よりも応答加速度が低減される可能性がある。ここでは安全側に応答低減効果は考慮しない。また、場合によっては線形応答時よりも応答が増加する可能性も考えられるが、評価対象の横置円筒形容器のように比較的剛な機器の場合はその影響は小さいと考え、本係数は次の通りとした。

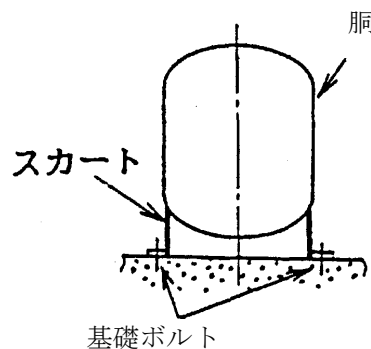
$$F_{NL} \text{の中央値} = 1.0, \quad \beta_R = \beta_U = 0 \quad (\text{解 119-7})$$

4) **機器応答評価に関するサブ応答係数  $F_4$**

4.1) **機器応答評価用入力地震動に関するサブ応答係数  $F_{ESS}$**  本係数は、設計で用いられる床応答曲線の持つ保守性及び不確実さに係るものである。設計応答評価では、剛な機器の場合でも応答増幅の可能性を考慮して、床応答の最大加速度（ZPA）の1.2倍

119.3.2 縦置円筒形容器の概要及び評価条件 縦置円筒形容器の諸元を次に示す。また、概略構造図を解説 119 図 4 に示す。

- ・評価対象機器：縦置円筒形容器
- ・耐震クラス：A s
- ・設置位置：原子炉周辺建屋
- ・基準地震動  $S_2$  の地動最大加速度：0.413G
- ・構造概要：縦置円筒形スカート支持
- ・固有周期：0.078 秒
- ・設計震度：水平 2.159 (G)、鉛直 0.288 (G)



解説 119 図 4 縦置円筒形容器の構造図

### 119.3.3 損傷確率評価

a) 耐力係数  $F_{CAP}$  の評価 耐力係数  $F_C$  は、強度係数  $F_S$  と塑性エネルギー吸収係数  $F_{\mu}$  の積として評価する。

#### 1) 強度係数 $F_S$ の評価

1.1) 損傷モード・部位 損傷部位は、上述の 119.2 と同様の取扱いで同定した。設計耐震評価における評価部位、材料、評価項目（一次応力、組合せ応力など）、許容値、設計発生応力、裕度（＝許容値／発生応力）を解説 119 表 3 に示す。表から、基礎ボルトの裕度が小さいことから、基礎ボルトを対象部位として、損傷モードを引っ張り損傷とした。

解説 119 表 3 縦置円筒形容器の耐震性評価結果

評価部位	材 料	評価項目	許容値 (N/mm <sup>2</sup> )*	発生応力 (N/mm <sup>2</sup> )*	裕 度
胴板	SUS304	座屈	10	3.6	2.8
スカート	SM400B	座屈	10	2.1	4.8
基礎ボルト	SNB7	引張応力	462	328	1.4

\*：座屈評価(無次元)を除く。

1.2) 基礎ボルトの強度係数の中央値 強度係数の中央値は、次式によって評価した。