

地震 PSA の特徴と課題**1. 特徴**

- (1) 地震に起因する原子力発電施設のリスク（耐震安全性）を、炉心損傷頻度（CDF）として不確実さ幅も合わせて定量的に把握することができる。
- (2) 耐震安全の観点で重要な事故シナリオ、設備を抽出することができる。
- (3) 地震国である我が国においては、内的事象 PSA の結果に比べて、地震 PSA の結果が大きくなる傾向にある。
- (4) 内的事象 PSA と比較すると、地震 PSA 特有の地震動の発生頻度評価（地震ハザード評価）、設備の損傷確率の評価（フラジリティ評価）に関する不確実さが大きいことから、CDF 評価結果の不確実さ幅が大きくなる。

**2. 手法にかかる技術的な課題**

以下の技術的な課題は原子力学会標準委員会にて策定中の地震 PSA の標準的な手法の中で検討予定。（平成16年度末に原案作成予定）

- (1) 地震ハザード評価\*、フラジリティ評価に本質的に付随する不確実さの評価は工学的判断等に基づく仮定に依存する割合が大きいため、仮定の標準的な考え方の検討が必要。

\*例：プレート境界地震のうち、敷地に対して支配的で大きな影響を与え、かつ切迫性のある地震の扱い

- (2) 地震動は各設備に共通に影響するため、システム設計の多重性の効果が内的事象に比べ小さくなることが予測される場所、同種の設備に地震動が作用した際の損傷確率の扱い（独立事象なのか従属事象なのか）を検討すること、地震時の人間系の過誤確率評価を検討すること、等が必要

**3. 地震 PSA 情報活用に関する課題**

- (1) 我が国においては地震 PSA 結果を判断するための指標が確立されていない。事実上の指標として、IAEA-INSAG の示す指標（既設炉： $10^{-4}$ /炉年、将来炉： $10^{-5}$ /炉年）が存在する。
- (2) 内的事象 PSA の結果に比べ、地震 PSA の結果が大きいため、不確実さの幅が大きいため、判断のための指標やそれと照合する際の考え方を検討する必要がある。
- (3) また、判断のための指標そのものが内的事象を対象としたそれとは違うものではないかとの議論がある\*。

\*安全目標専門部会中間とりまとめ：外部事象によるリスクについて、「…、

例えば当該外部事象が発生した場合に敷地周辺に発生すると予想される原子力施設によらない被害の大きさとその発生確率の比較においてその抑制水準を考えるとといったアプローチも考えられる。」

- (4) 個別施設への適用は、規制活動全体の判断への活用を通じた経験を積んだ後としている\*。

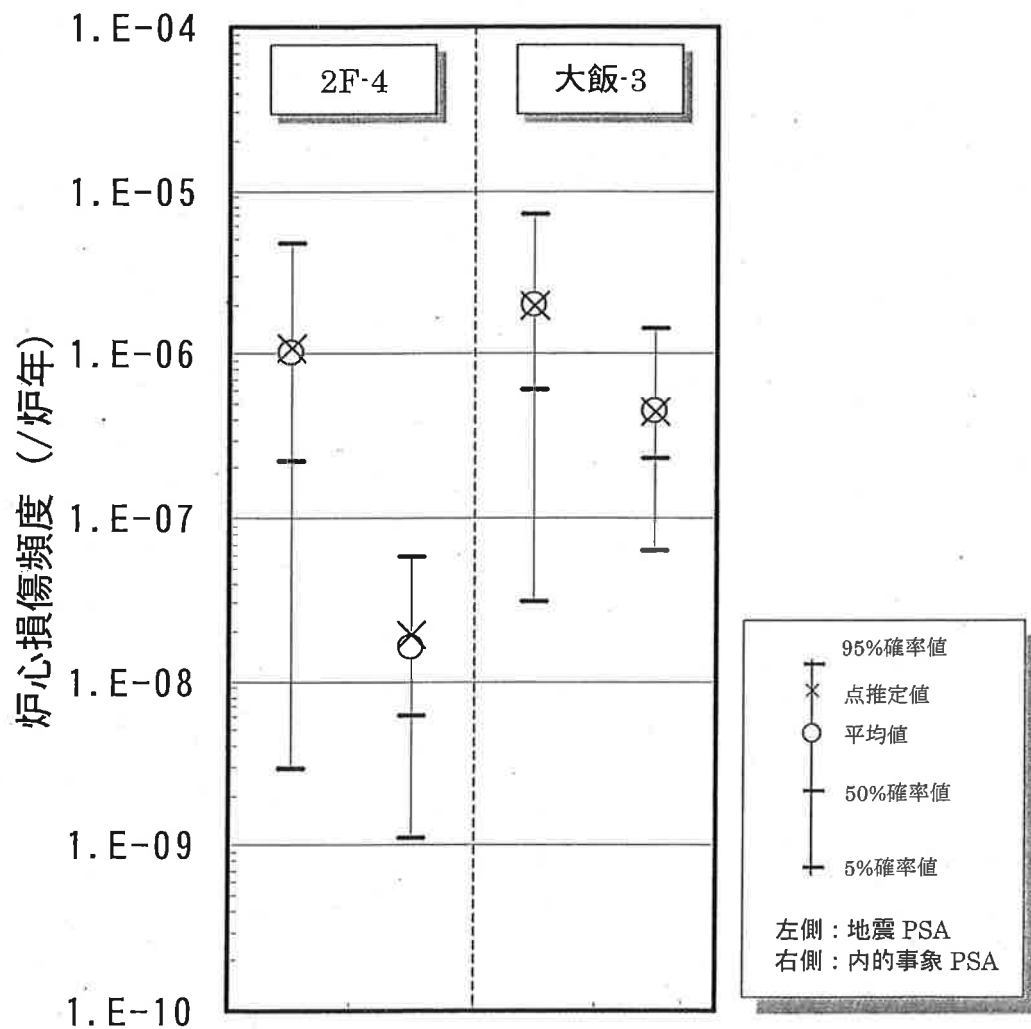
\*安全目標専門部会中間とりまとめ：安全目標の適用について、「・・・、まずは規制活動の合理性、整合性といった各種規制活動の全体にわたる判断の参考として適用し、個別の施設に対する規制等、より踏み込んだ適用は、安全目標適用の経験を積んだ段階で着手するのが適切としている。」

以 上

平成 16 年 8 月 23 日

## 産業界地震 PSA 評価結果例

- ご説明した手法に基づく評価の例として、BWR (2F-4)、PWR (大飯-3) の評価結果を、内の事象 PSA の結果とあわせて示す。
- 本評価結果は、研究で詳細に評価を実施している炉についてのものであり、今後の検討を踏まえた結果の変動があることや、他の炉・サイトの結果を代表するものではないことに留意が必要である。
- 内の事象 PSA に比べ、平均値で 1~2 桁大きく、不確実さの幅も内の事象 PSA では 2 桁程度であるのに対し、地震 PSA では、3~4 桁程度と大きくなる。



本ドキュメントには、各電力会社またはその他の企業の秘密情報（未特許出願発明、ノウハウ等）が含まれている可能性があります。これら当事者の許可なく本ドキュメントの複製物を作成すること、ならびに本ドキュメントの内容を第三者に開示、公開する行為を禁止します。

# 国内産業界の地震 PSA 手法 ～システム信頼性評価～

## 0. 地震 PSA の概要

地震 PSA は、大別して、システム信頼性評価、地震ハザード評価、機器/構築物の損傷確率評価（フラジリティ評価）から成る。 → 図-1

システム信頼性評価で実施する以下の内容を次項以降に示す。ただし、いまだなお検討の余地の大きい格納容器健全性評価については言及しない。

- ① プラント設計に関する情報の入手
- ② 事故シナリオの分析と起因事象の選定
- ③ 事故シーケンスの分析（成功基準の設定とイベントツリーの作成）
- ④ システムのモデル化
- ⑤ 事故シーケンスの定量化
- ⑥ 格納容器健全性の評価

## 1. プラント設計に関する情報の入手

地震時及び地震後に原子炉施設を安全な状態に維持するために必要な機能（及びそれを実現する機器）を把握するため、評価対象プラントの運転・設計に関する情報を収集する。

特に、地震時の荷重に対するプラントの影響や従属故障の分析上重要な支持構造物等を評価で考慮するために、配置上の特徴及び耐震設計上の特徴に着目して情報を収集する。

## 2. 事故シナリオの分析と起因事象の分類

原子炉施設に共通要因的な荷重として作用するという地震の特性も踏まえ、一般には内的事象 PSA で考慮している事故シナリオをベースに、内的事象 PSA で考慮している事故シナリオとの重複を回避しつつ、地震時に特有の影響を考慮して事故シナリオの範囲を明確にする。

それに基づいて起因事象を分類する。事故シナリオの範囲の例を以下に示す。 → 図-2

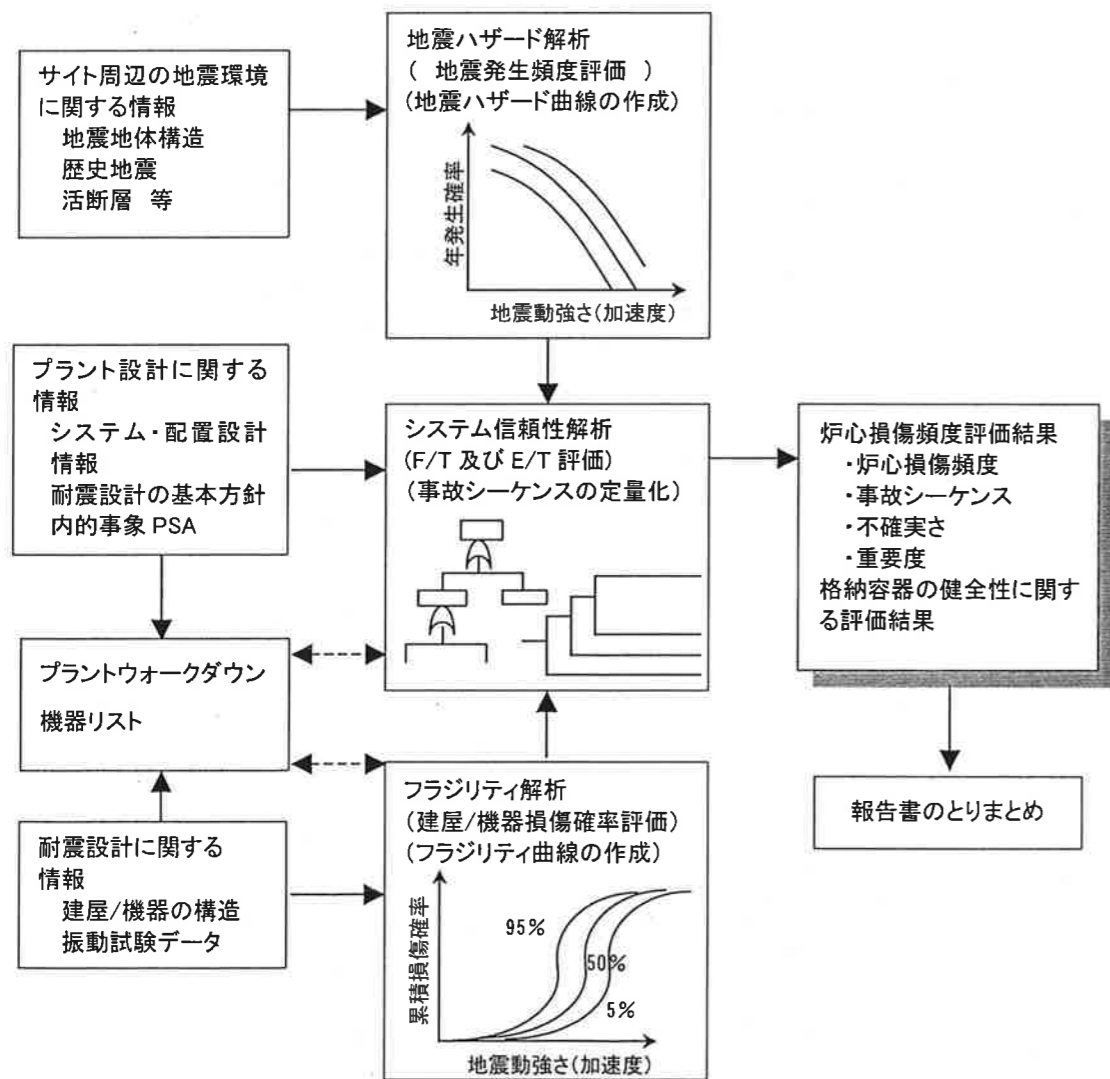


図-1：地震 PSA 手順の概略評価フロー

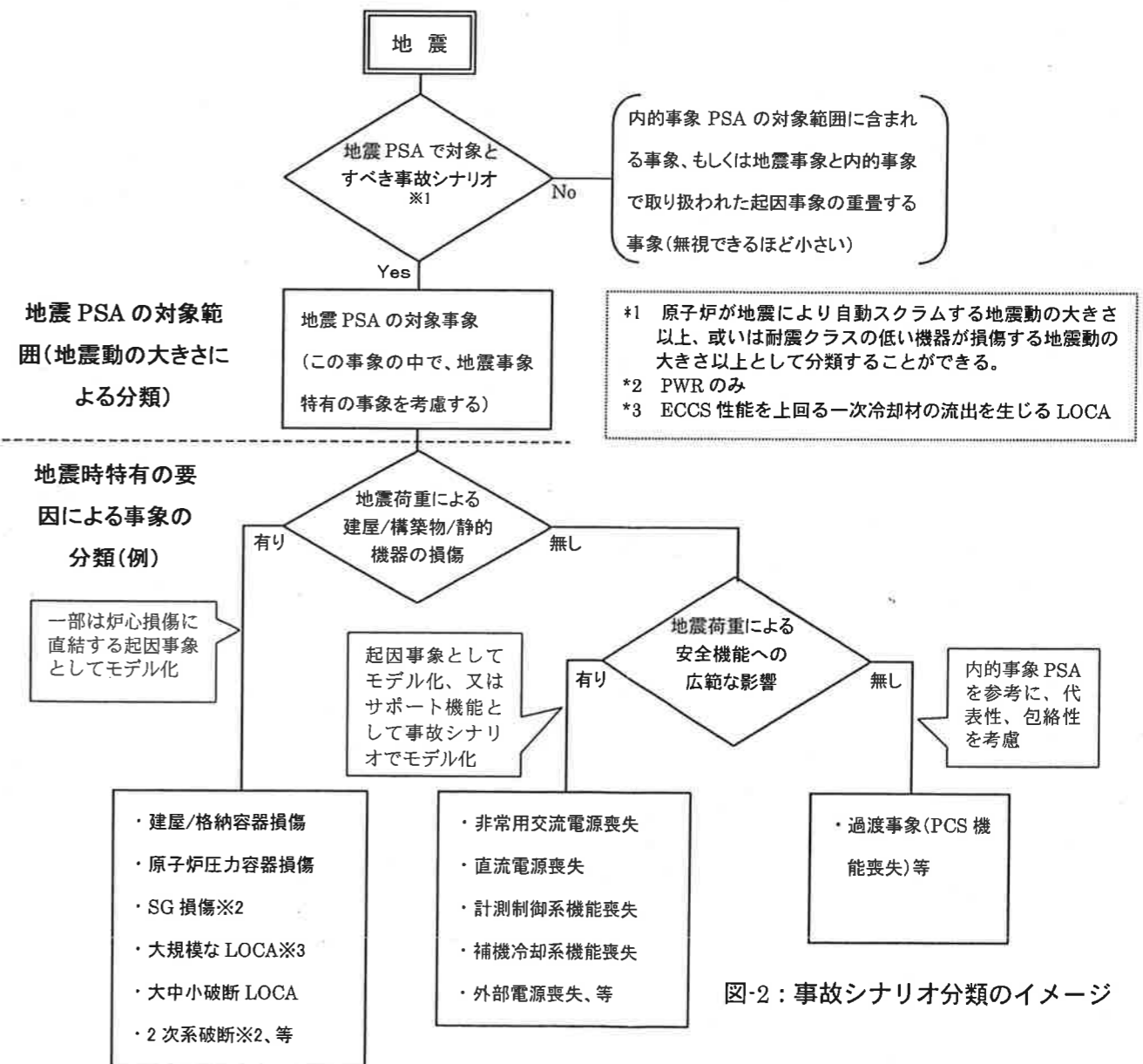


図-2：事故シナリオ分類のイメージ

本ドキュメントには、各電力会社またはその他の企業の秘密情報（未特許出願発明、ノウハウ等）が含まれている可能性があります。これら当事者の許可なく本ドキュメントの複製物を作成すること、ならびに本ドキュメントの内容を第三者に開示、公開する行為を禁止します。

# 国内産業界の地震 PSA 手法 ～システム信頼性評価～

## 3. 事故シーケンスの分析

### (1) 成功基準の設定

成功基準は、内的事象 PSA の成功基準をベースとするが、以下に示す地震時の特徴を踏まえて設定する。

- 原子炉建屋等の構築物が損傷した場合には、その後の事象進展を予測することが困難であることに加え、建屋内にある安全機能（ECCS 等）の健全性も確保できない可能性が高いため、原子炉建屋等の損傷に対しては成功基準を設定し得ない。
- 地震に対する耐力が他の設備に比べて小さい設備や、このような設備に構造的/機能的に依存している設備は、最初から機能喪失しているものと仮定してもよい。

【BWR】外部電源に関連する設備（セラミックインシュレータ）の脆弱性に鑑み、炉心損傷に至るような地震動の入力がある場合には必ず外部電源が機能喪失するものとして扱う。したがって、常用電源のみを駆動源とするもの（給復水系による注水、復水器による除熱等）は成功基準として考慮しない。

【PWR】炉心損傷に至るような地震動の入力がある場合には必ず主給水系が機能喪失するものとして扱う。このため主給水喪失時における主給水系の復旧は成功基準として考慮しない。

### (2) イベントツリーの作成

イベントツリーは、内的事象 PSA のイベントツリーを参考に、以下に示す点に留意してヘディングの選定とツリーの作成を行う。 → 図-3、図-4

- 内的事象 PSA では損傷確率の小ささから考慮していなかった構築物や静的機器の損傷も考慮する。
- 建屋・構築物の損傷等、プラント挙動に対する影響が現在の知見では明確にできない場合、保守的にこれらの損傷をもって炉心損傷とする。
- 構築物等の損傷が複数の安全機能に同時に影響を及ぼす可能性を明示的に評価するためにこれらを独立のヘディングとして取り扱う方法もとられる。

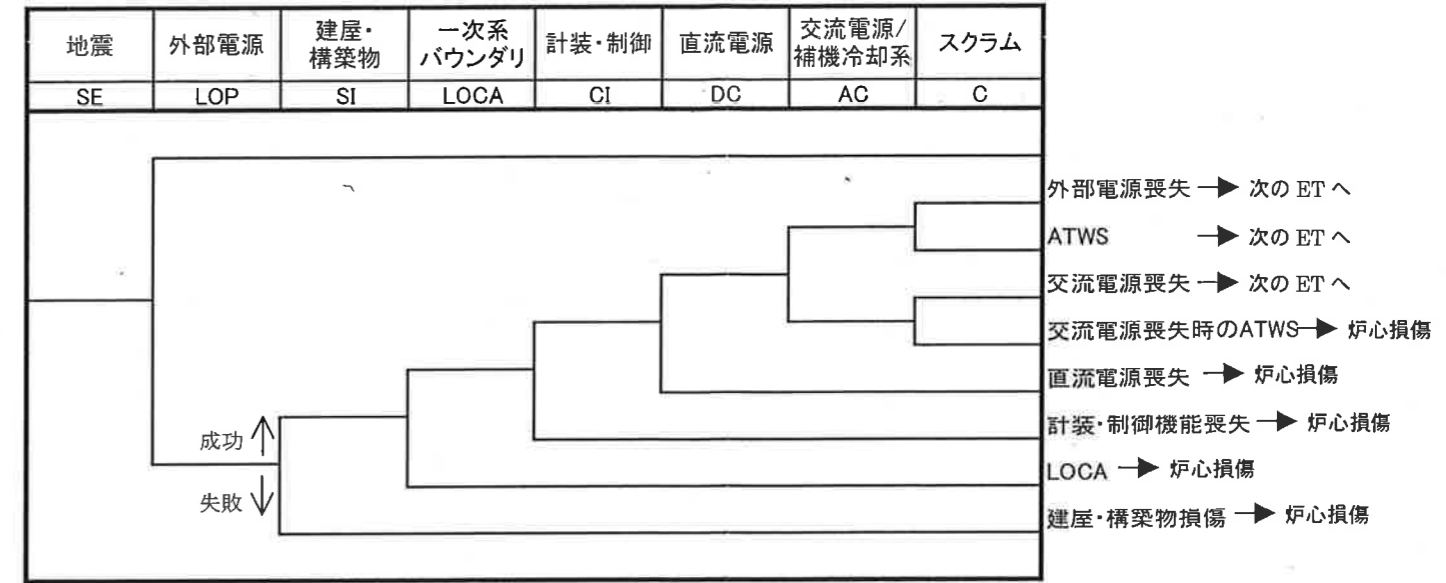


図-3：産業界 BWR 評価におけるイベントツリーの例

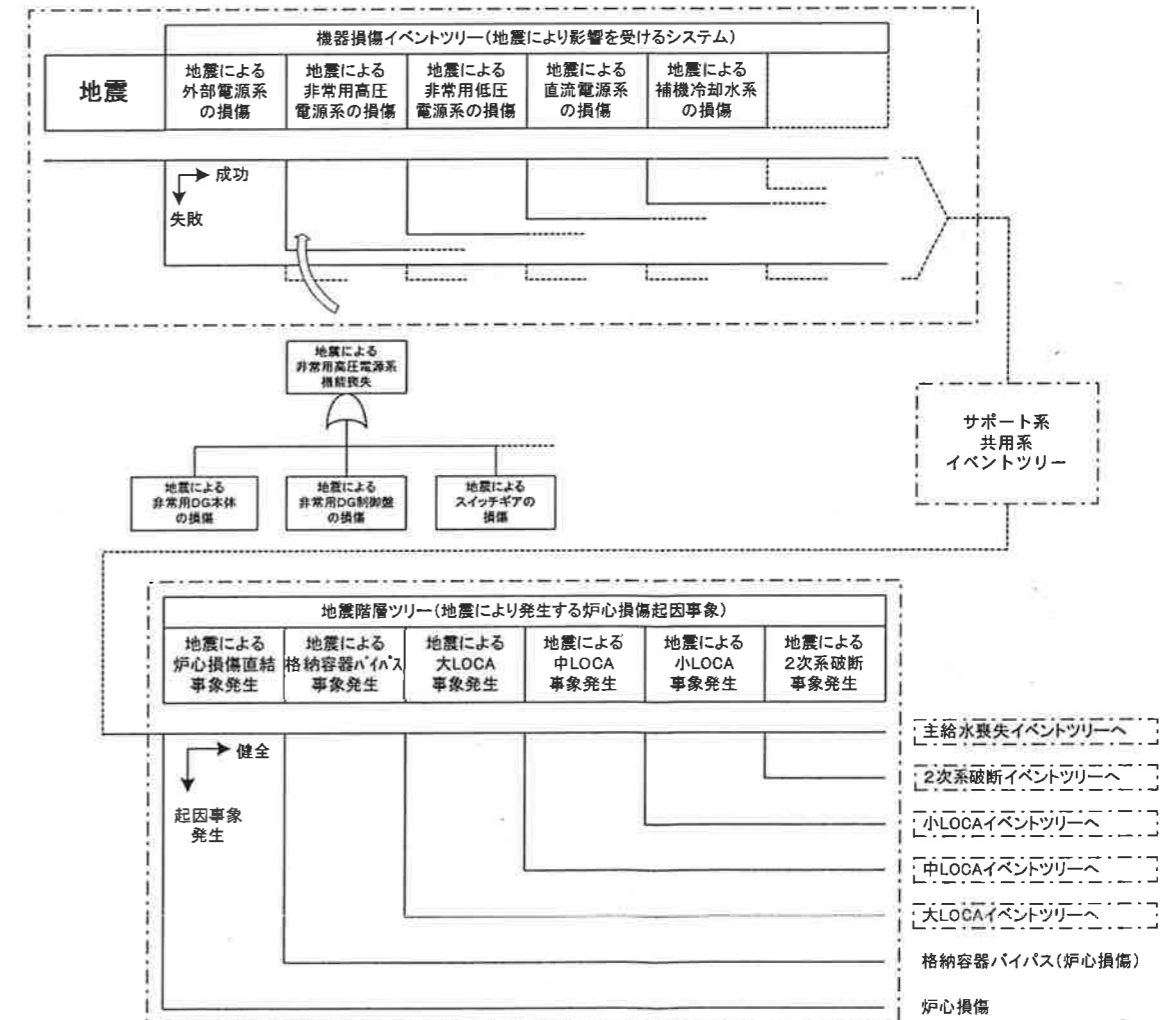


図-4：産業界 PWR 評価におけるイベントツリーの例

本ドキュメントには、各電力会社またはその他の企業の秘密情報（未特許出願発明、ノウハウ等）が含まれている可能性があります。これら当事者の許可なく本ドキュメントの複製物を作成すること、ならびに本ドキュメントの内容を第三者に開示、公開する行為を禁止します。

# 国内産業界の地震 PSA 手法 ～システム信頼性評価～

## 4. システムのモデル化

### (1) フォールトツリーの作成

フォールトツリーは、成功基準をもとに頂上事象を明確にしてシステムの機能喪失に至る原因を組み合わせて作成する。基事象として、地震荷重による建屋・構築物・機器の損傷、機器のランダム故障等を考慮する。 → 図-5

ここで、図-5 では地震荷重による損傷を大フォールトツリーでモデル化している BWR 評価（小イベントツリー／大フォールトツリー法）の例のみを示している。一方、PWR 評価（大イベントツリー／小フォールトツリー法）では、図-4 に示すとおり地震荷重による損傷とランダム故障を個別の小フォールトツリーとして作成し大イベントツリーでモデル化している。

### (2) 地震荷重による建屋・構築物・機器の損傷

地震荷重による損傷要因として機能損傷または構造損傷、機器の支持構造物の構造損傷等を考慮する。地震による損傷に対する復旧は考慮しない。

### (3) ランダム故障等の設定

機器故障として待機中の機器の起動失敗や、起動後の運転継続失敗等を考慮し、内的事象 PSA のフォールトツリーと同様のものを用いる。

### (4) 従属故障の分析

機器間の損傷の相関性を定量化するためのデータが不足しているため、冗長性を有する同種機器の損傷に完全従属（同じ加速度であれば同じ損傷）を仮定する。

### (5) 人間信頼性解析

基本的には内的事象 PSA と同じ考え方に基づいて THERP を適用する。

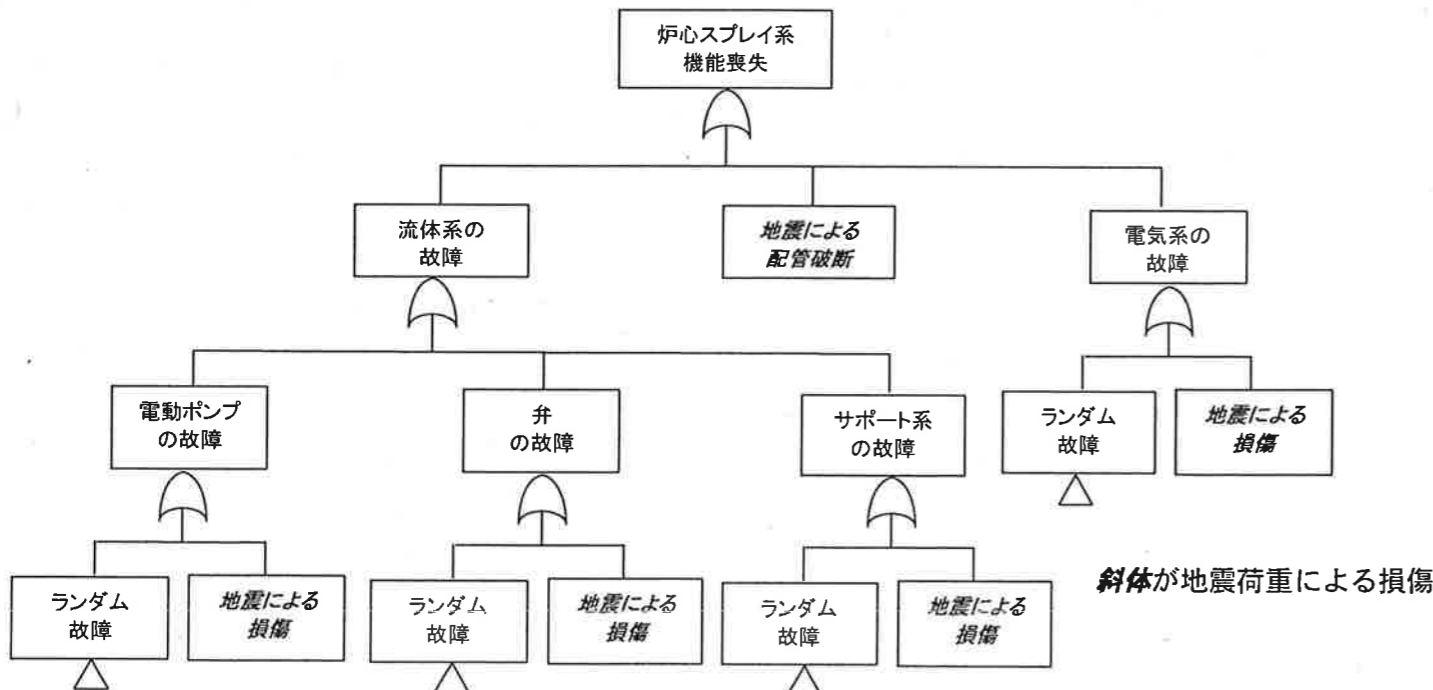


図-5：産業界 BWR 評価におけるフォールトツリーの例

## 5. 事故シーケンスの定量化

イベントツリー、フォールトツリーで定義される個々の事故シーケンスの発生頻度を算出し、これに基づいて炉心損傷頻度を算出する。さらに、得られた結果に大きな影響を与える因子の把握（重要度解析）や、評価に必然的に内包される不確実さの評価（不確実さ解析）も行う。

→ 図-6

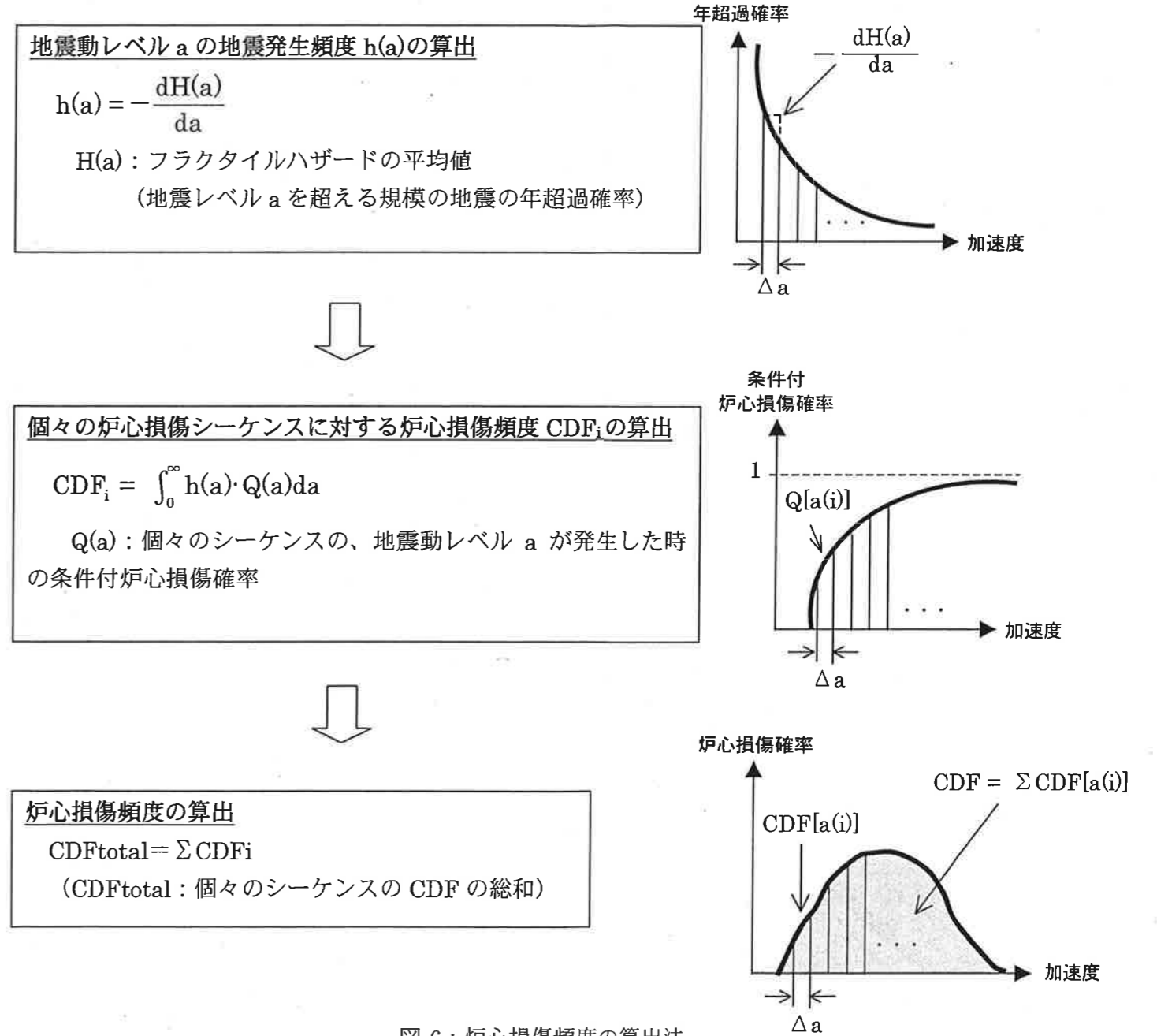


図-6：炉心損傷頻度の算出法

以上



# 国内産業界の地震PSA手法 ～地震ハザード評価～

## 1. 評価手法の概要

### 1) 地震ハザード評価の方法論

- 活断層資料および歴史地震史料による震源モデルの作成(活断層震源および領域震源)
- 距離減衰式等による地震動評価とその重合せ(活断層と関連付けられる地震は活断層で評価)
- 地震発生モデルは原則として定常ポアソン過程(推本評価断層や固有地震等は例外)
- 水平動のみを対象として評価(上下動は考慮せず)

### 2) 震源モデル

#### ① 地震活動領域の設定

- 評価対象範囲 サイトから100km程度以内
- 活断層震源 断層面(長さ×幅)を仮定、各断層ごとにモデル化  
活断層資料:設置許可申請書(優先)や新編日本の活断層等(参考)
- 領域震源 地震地体構造マップ(萩原マップ)により設定した領域区分ごとにモデル化  
歴史地震史料(最大マグニチュード(M)評価用):新編組合せカタログ

#### ② 活断層震源の地震活動度評価

- 断層の幾何学的形状 断層上端深さ:3km(仮定)  
断層幅:断層長さに等しい(上限15km)  
傾斜角:活断層資料の記載値が基本(不明確な場合は90°を仮定)
- 地震の発生頻度 調査結果による再来期間が基本(ない場合は松田式)
- 地震の規模 松田式や断層面の大きさ(面積)に基づく評価式により決定

#### ③ 領域震源の地震活動度評価

- 震源深さ 地震発生層での地震分布に従う(ない場合は一様分布や一定値)
- 地震の発生頻度 気象庁データ等の利用、G-R式や3パラメータ式による評価
- 地震の規模 最小M=5.0、最大M=既往最大かつM≥6.5
- 余震 除去する(NUPECの検討例)

### 3) 地震動伝播モデル

- 距離減衰式 耐専スペクトルの利用、気象庁マグニチュードによる最大加速度の評価  
補正:内陸地震補正係数を考慮、最大加速度の頭打ちは考慮しない  
ばらつき:自然対数標準偏差 $\beta=0.5$ を考慮

### 4) 地震ハザードの算定

- 耐専スペクトルの周期0.02秒における最大加速度で地震ハザード曲線を記載

### 5) 不確実性の考慮

- ロジックツリー(暫定)により諸値や評価式等の不確実さを考慮
- フラクタイル地震ハザード曲線により結果を表示

#### \* 留意事項(サイトマター)

- セグメント(断層長さ及び破壊形式)の扱い
- プレート境界地震やスラブ内地震の扱い
- 断層モデルによる評価

## 2. 評価例 \* 左記の『評価手法の概要』に従った結果の一例を示す。

### 1) PWRプラントの場合

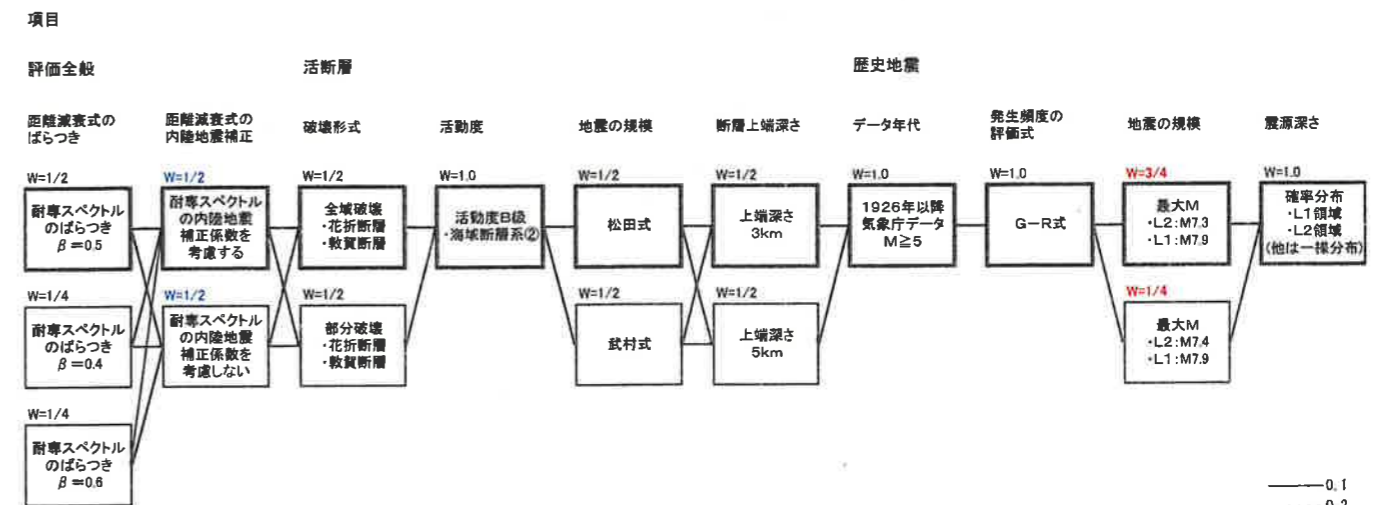


図1. ロジックツリー

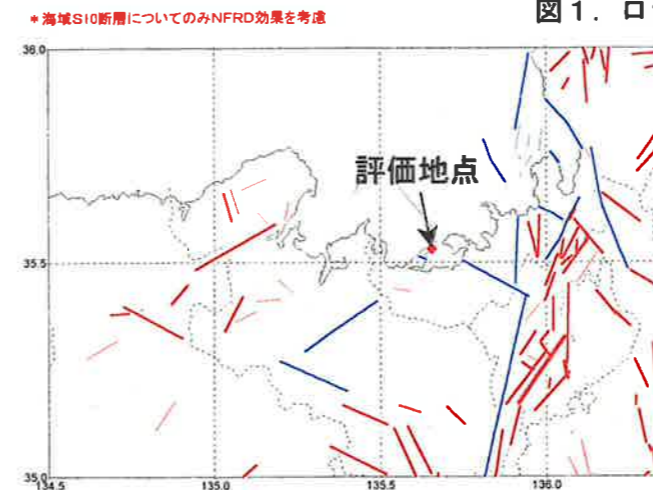


図2. 評価サイト周辺の活断層

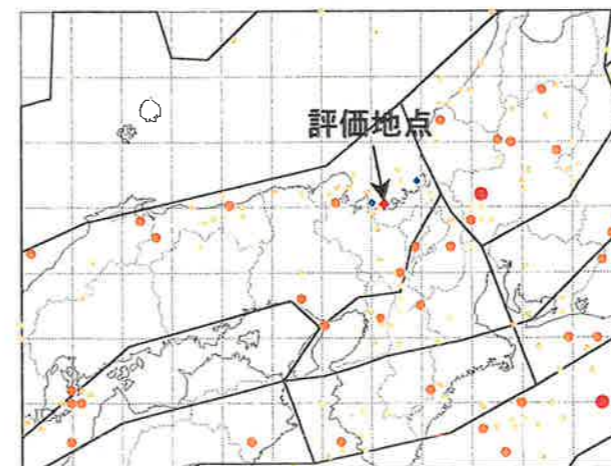


図3. 評価サイト周辺の歴史地震 (M≥6.0のみ記載)

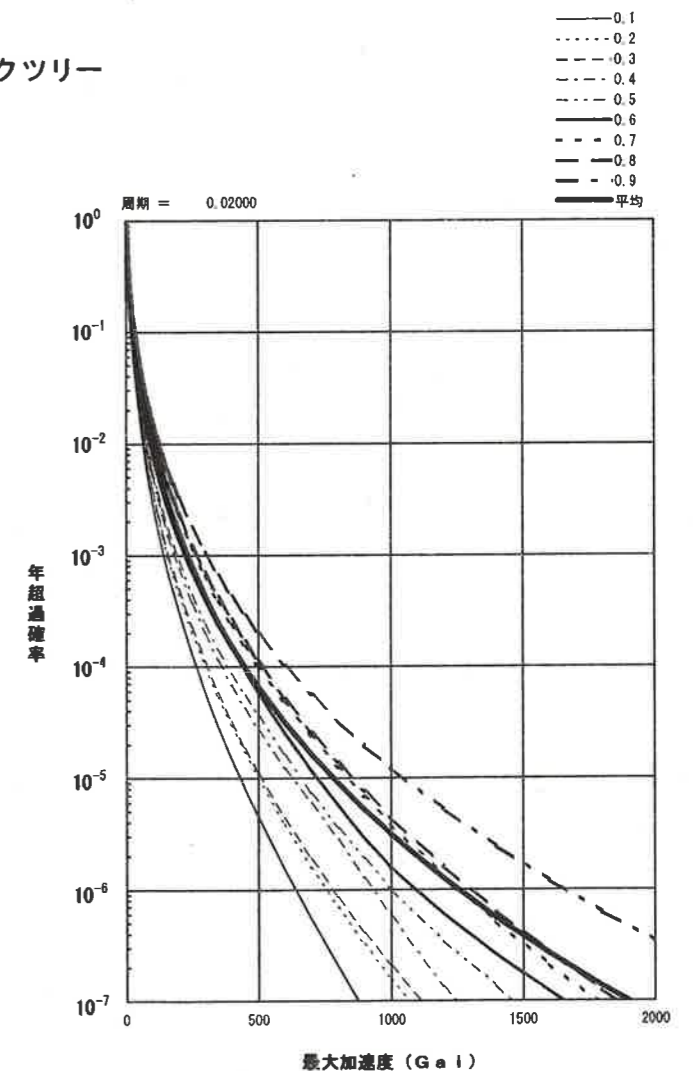


図4. フラクタイルハザード曲線

本ドキュメントには、各電力会社またはその他の企業の秘密情報(未特許出願発明、ノウハウ等)が含まれている可能性があります。これら当事者の許可なく本ドキュメントの複製物を作成すること、ならびに本ドキュメントの内容を第三者に開示、公開する行為を禁止します。

2) BWRプラントの場合

○主な特徴

- ①プレート境界地震について距離減衰式のサイト補正を考慮(LT)
- ②領域区分は、萩原マップを更に細分化した区分を考慮(LT)
- ③気象庁データは、1926～および1983～の二つを考慮(LT)
- ④やや深発地震による地震動は2倍とする
- ⑤耐専スペクトルの内陸補正係数(0.6)を導入(LT)  
(LTはロジックツリー)

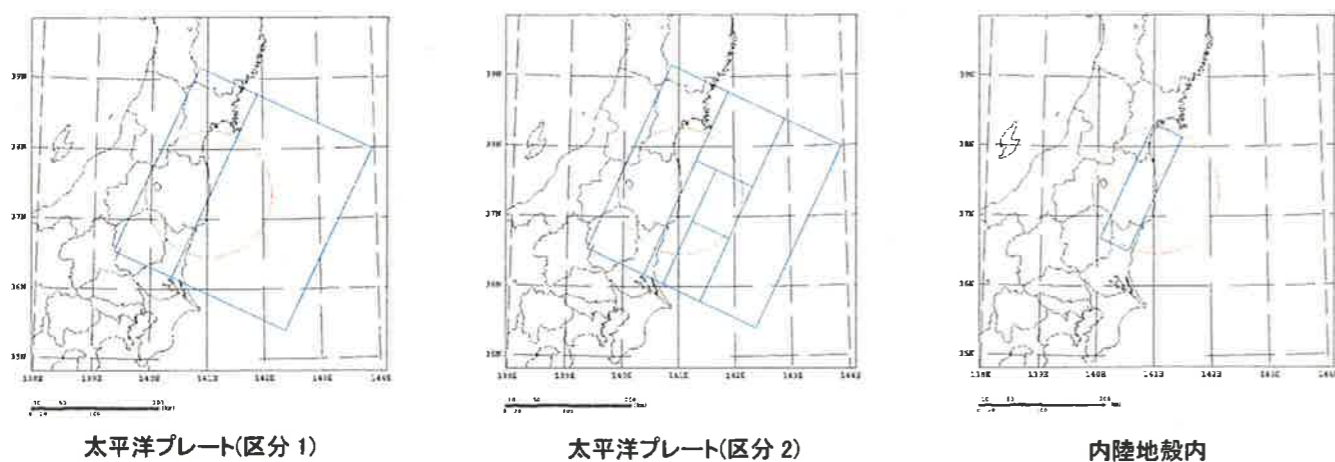


図5. 地震活動域のモデル化

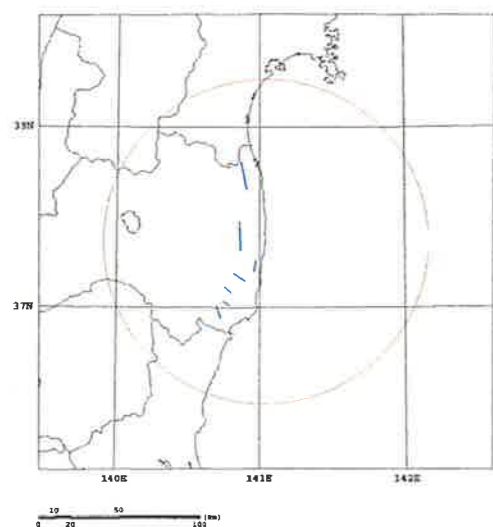


図6. 活断層のモデル化

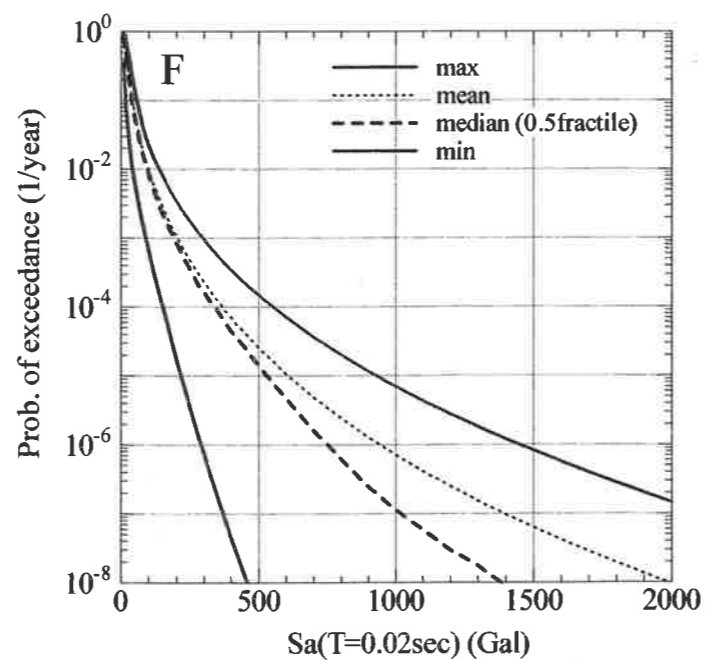


図7. フラクタイルハザード曲線

本ドキュメントには、各電力会社またはその他の企業の秘密情報（未特許出願発明、ノウハウ等）が含まれている可能性があります。これら当事者の許可なく本ドキュメントの複製物を作成すること、ならびに本ドキュメントの内容を第三者に開示、公開する行為を禁止します。



## 1. 安全係数法の概要

### 1) 評価の基本的枠組み

- 建屋・機器毎に最大地動加速度(PGA)の大きさに応じた損傷確率として算定
- 設計解析における建屋・機器の耐力、建屋の応答、機器の応答に含まれる各種裕度及び不確かさを、それぞれ安全係数として抽出
- 安全係数はいずれも対数正規分布を仮定し、中央値  $F$ 、物理現象固有のランダム性による不確かさに関する対数標準偏差  $\beta_r$ 、知識や認識に係わる不確かさに関する対数標準偏差  $\beta_u$  で表現
- 設計解析における基準地震動のPGAに各安全係数を乗じることにより、フラジリティ中央値を算定
- フラジリティの対数標準偏差  $\beta_r, \beta_u$  は、各安全係数の  $\beta_r, \beta_u$  をそれぞれ二乗和平方根(RSS)をとることにより算定
- 損傷下限の目安である高信頼度低損傷確率(HCLPF)を95%信頼度5%損傷確率と仮定

### 2) 評価対象と損傷モード(形態)

#### ① 評価対象建屋・機器

- ・炉心損傷評価に係わる以下を対象
  - ✓ 耐震Aクラス以上の機器類
  - ✓ 耐震Aクラス以上の機器の間接支持機能を有する建屋
  - ✓ その他 外電系設備、AM的に利用できる設備 等

#### ② 評価部位

- ・設計解析等を参照して裕度が最も小さくなると推定される部位

#### ③ 損傷モード

- ・設備の特性に応じて以下のような損傷モードを考慮
  - ✓ 構造損傷 [機器] 延性破壊、脆性破壊 [建屋] 耐震壁のせん断破壊
  - ✓ 機能損傷 [機器] 動的機能限界、電気的機能限界

### 3) 評価する安全係数

#### ① 耐力係数 $F_{SC}, F_{EC}$ [建屋・機器毎に評価]

- ・強度係数  $F_S$  設計解析上の入力に対して構造的・機能的限界を持つ裕度
- ・塑性エネルギー吸収係数  $F_\mu$  塑性変形によるエネルギー吸収による裕度

#### ② 建屋応答係数 $F_{SR}$ [建屋・機器共通で評価]

- ・スペクトル形状係数  $F_{SS}$  基準地震動ターゲットスペクトルを持つ裕度
- ・減衰定数係数  $F_\delta$  建屋の現実的減衰定数による応答に含まれる裕度
- ・モデル化係数  $F_M$  実機と設計解析モデルの固有値の差による裕度
- ・非線形応答係数  $F_{NL}$  建屋非線形応答による床応答スペクトル(FRS)の変動に関する裕度 [機器毎に評価]

#### ③ 機器応答係数 $F_{ER}$ [機器毎に評価]

- ・スペクトル形状係数  $F_{ESS}$  設計用FRSの拡幅を持つ裕度
- ・減衰定数係数  $F_D$  機器の現実的減衰定数による応答に含まれる裕度
- ・モデル化係数  $F_{EM}$  実機と設計解析モデルの固有値の差による裕度
- ・モード合成係数  $F_{EMC}$  モーダル解析のモード合成法の裕度

## 2. 安全係数法による評価例

### 1) 機器機能損傷 ～PWR制御盤の例～

#### ① 基本情報の調査

- ・評価対象設備: 制御盤(大飯3号機)
- ・設置床: 原子炉周辺建屋 EL.+10.0m
- ・基準地震動( $S_2$ )のPGA: 405Gal
- ・基準地震動( $S_2$ )に対する設置床面の応答加速度: 0.498G
- ・機能維持確認済加速度: 2.2G

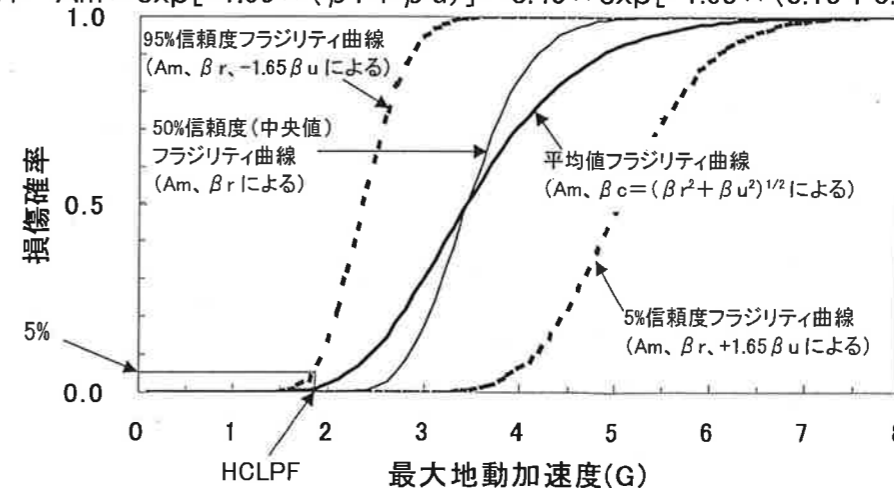
#### ② 安全係数の評価

- ・ $F_S$  機能維持確認済加速度をHCLPF値として、 $\beta_r, \beta_u$  を与えることにより中央値を推定
- ・ $F_\mu$   $\equiv 1.0$ (弾性範囲内で誤動作が生じることが否定できない)
- ・ $F_{SS}$  基準地震動ターゲットスペクトルと一様ハザードスペクトル(UHS;地震ハザード評価より得られる)の設計1次固有周期における比
- ・ $F_\delta$  設置床(建屋)の設計及び現実的な減衰定数による基準地震動スペクトルの設計1次固有周期における比
- ・ $F_M$  設置床(建屋)の設計及び現実的な剛性に対応した1次固有周期での基準地震動スペクトルの比
- ・ $F_{NL}$   $\equiv 1.0$ (ZPAについては非線形応答による入力加速度レベルに応じた変動は小)
- ・ $F_{ESS}, F_D, F_{EM}, F_{EMC}$   $\equiv 1.0$ (機能維持確認試験の結果に含まれる)

	$F_{EC}$			$F_{SR}$					$F_{ER}$				合計	
	$F_S$	$F_\mu$	計	$F_{SS}$	$F_\delta$	$F_M$	$F_{NL}$	計	$F_{ESS}$	$F_D$	$F_{EM}$	$F_{EMC}$		計
中央値	7.01	1.00	7.01	1.17	0.99	1.03	1.00	1.19	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	8.36
$\beta_r$	0.11	0.00	0.11	0.00	0.07	0.07	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15
$\beta_u$	0.17	0.00	0.17	0.00	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23

#### ③ フラジリティの算定

- ・フラジリティ加速度の中央値  $A_m$ 、不確かさ  $\beta_r, \beta_u$   
 $A_m = F_{total} \times A_{PGA} = 8.36 \times (405/980) = 3.45$  [G]  $\beta_r = 0.15$   $\beta_u = 0.23$
- ・フラジリティ加速度のHCLPF値  $A_{HCLPF}$   
 $A_{HCLPF} = A_m \times \exp[-1.65 \times (\beta_r + \beta_u)] = 3.45 \times \exp[-1.65 \times (0.15 + 0.23)] = 1.84$  [G]



国内産業界の地震 PSA 手法 ～建屋・機器 fragility 評価～

2) 機器機能損傷 ～PWR 充てんポンプの例～

① 基本情報の調査

- ・評価対象設備: 充てんポンプ(大飯3号機)
- ・設置床: 原子炉周辺建屋 EL.+10.0m
- ・基準地震動(S<sub>2</sub>)のPGA: 405Gal
- ・基準地震動(S<sub>2</sub>)に対する設置床面の応答加速度: 0.498G
- ・機能維持確認済加速度: 1.4G

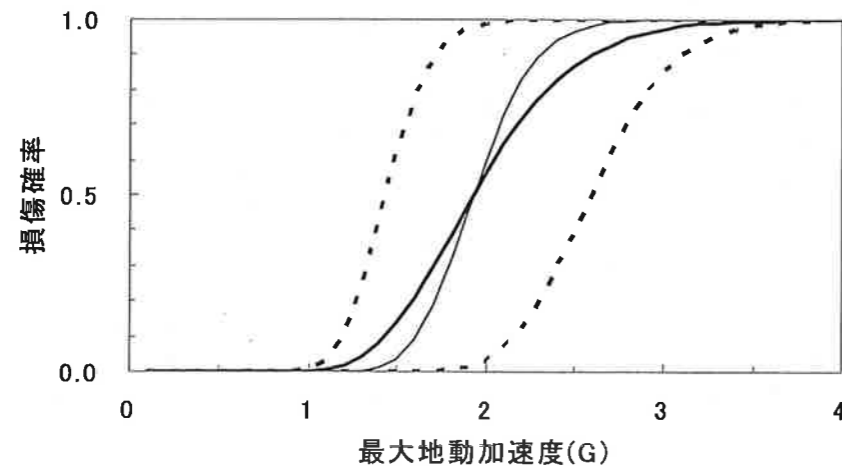
② 安全係数の評価

- ・F<sub>s</sub> 機能維持確認済加速度をHCLPF値として、β<sub>r</sub>, β<sub>u</sub> を与えることにより中央値を推定
- ・F<sub>μ</sub> ≡ 1.0(弾性範囲内で誤動作が生じることが否定できない)
- ・F<sub>SS</sub> 基準地震動ターゲットスペクトルと一様ハザードスペクトル(UHS;地震ハザード評価より得られる)の設計1次固有周期における比
- ・F<sub>δ</sub> 設置床(建屋)の設計及び現実的な減衰定数による基準地震動スペクトルの設計1次固有周期における比
- ・F<sub>M</sub> 設置床(建屋)の設計及び現実的な剛性に対応した1次固有周期での基準地震動スペクトルの比
- ・F<sub>NL</sub> ≡ 1.0(ZPAについては非線形応答による入力加速度レベルに応じた変動は小)
- ・F<sub>ESS</sub>, F<sub>D</sub>, F<sub>EM</sub>, F<sub>EMC</sub> ≡ 1.0(機能維持確認試験の結果に含まれる)

	F <sub>EC</sub>			F <sub>SR</sub>					F <sub>ER</sub>					合計
	F <sub>s</sub>	F <sub>μ</sub>	計	F <sub>SS</sub>	F <sub>δ</sub>	F <sub>M</sub>	F <sub>NL</sub>	計	F <sub>ESS</sub>	F <sub>D</sub>	F <sub>EM</sub>	F <sub>EMC</sub>	計	
中央値	3.92	1.00	3.92	1.17	0.99	1.03	1.00	1.19	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.68
β <sub>r</sub>	0.10	0.00	0.10	0.00	0.07	0.07	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
β <sub>u</sub>	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18

③ fragility の算定

- ・fragility 加速度の中央値 A<sub>m</sub>、不確かさ β<sub>r</sub>, β<sub>u</sub>  
 $A_m = F_{total} \times A_{PGA} = 4.68 \times (405/980) = 1.93$  [G]    β<sub>r</sub> = 0.14    β<sub>u</sub> = 0.18
- ・fragility 加速度のHCLPF値 A<sub>HCLPF</sub>  
 $A_{HCLPF} = A_m \times \exp[-1.65 \times (\beta_r + \beta_u)] = 1.93 \times \exp[-1.65 \times (0.14 + 0.18)] = 1.14$  [G]



3) 機器機能損傷 ～BWR 制御盤の例～

① 基本情報の調査

- ・評価対象設備: 制御盤(2F-3/4)
- ・設置床: 制御建屋
- ・基準地震動(S<sub>1</sub>)のPGA: 180Gal
- ・基準地震動(S<sub>1</sub>)に対する設置床面の応答加速度: 0.25G
- ・機能維持確認済加速度: 6.1G

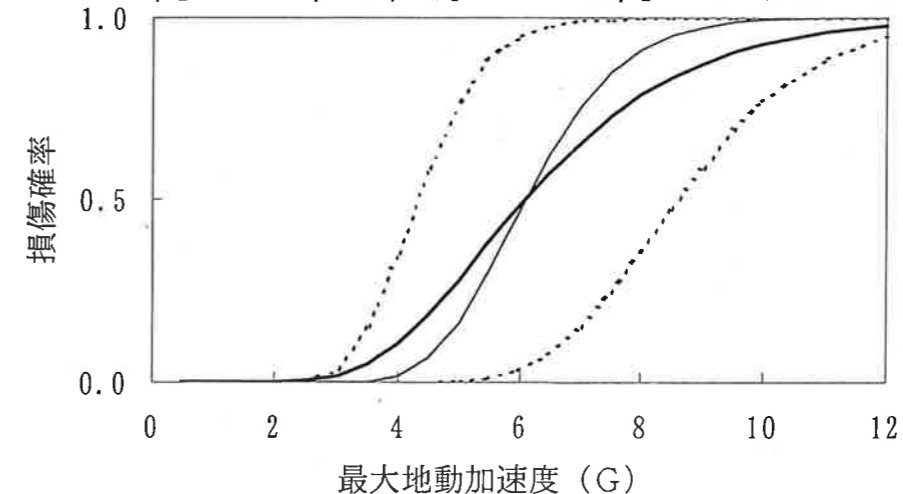
② 安全係数の評価 (下線付きは機器に応じて変わるもの)

- ・F<sub>s</sub> 機能維持確認済加速度をHCLPF値として、β<sub>r</sub>, β<sub>u</sub> を与えることにより中央値を推定
- ・F<sub>μ</sub> ≡ 1.0(弾性範囲内で誤動作が生じることが否定できない)
- ・F<sub>SS</sub> 基準地震動ターゲットスペクトルと一様ハザードスペクトル(UHS;地震ハザード評価より得られる)の設計1次固有周期における比
- ・F<sub>δ</sub> 設置床(建屋)の設計及び現実的な減衰定数による基準地震動スペクトルの設計1次固有周期における比
- ・F<sub>M</sub> 設置床(建屋)の設計及び現実的な剛性に対応した1次固有周期での基準地震動スペクトルの比
- ・F<sub>NL</sub> ≡ 1.0(非線形応答による入力加速度レベルに応じた変動の影響を考慮)
- ・F<sub>ESS</sub>, F<sub>D</sub>, F<sub>EM</sub>, F<sub>EMC</sub> ≡ 1.0(機能維持確認試験の結果に含まれる)

	F <sub>EC</sub>			F <sub>SR</sub>					F <sub>ER</sub>					合計
	F <sub>s</sub>	F <sub>μ</sub>	計	F <sub>SS</sub>	F <sub>δ</sub>	F <sub>M</sub>	F <sub>NL</sub>	計	F <sub>ESS</sub>	F <sub>D</sub>	F <sub>EM</sub>	F <sub>EMC</sub>	計	
中央値	38.6	1.00	38.6	0.86	1.00	1.00	1.00	0.86	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	33.2
β <sub>r</sub>	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
β <sub>u</sub>	0.20	0.00	0.20	0.00	0.00	0.15	0.10	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27

③ fragility の算定

- ・fragility 加速度の中央値 A<sub>m</sub>、ばらつき β<sub>r</sub>、不確かさ β<sub>u</sub>  
 $A_m = F_{total} \times A_{PGA} = 33.2 \times (180/980) = 6.10$  [G]    β<sub>r</sub> = 0.20    β<sub>u</sub> = 0.27
- ・fragility 加速度のHCLPF値 A<sub>HCLPF</sub>  
 $A_{HCLPF} = A_m \times \exp[-1.65 \times (\beta_r + \beta_u)] = 6.10 \times \exp[-1.65 \times (0.20 + 0.27)] = 2.81$  [G]



4) 機器機能損傷 ～BWR残留熱除去系冷却水ポンプの例～

① 基本情報の調査

- ・評価対象設備: 残留熱除去系冷却水ポンプ(2F-3/4)
- ・設置床: 原子炉建屋
- ・基準地震動( $S_1$ )のPGA: 180Gal
- ・基準地震動( $S_1$ )に対する設置床面の応答加速度: 0.18G
- ・同種機器の機能維持確認試験における機能維持確認済加速度: 10.0G(本体), 2.5G(電動機)
- ・要素試験に基づく推定機能維持確認済加速度: 11.0G(本体; 裕度 1.1), 5.0G(電動機; 裕度 2.0)  
⇒ 電動機が地震時の損傷に関して支配的と考えられる。

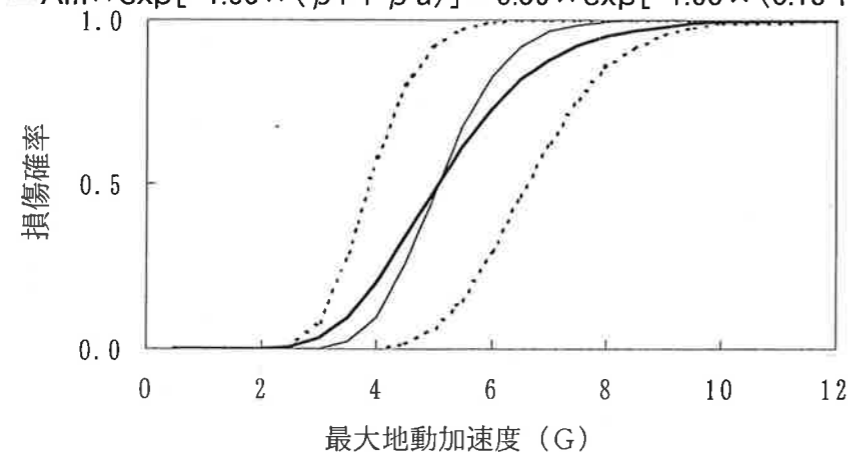
② 安全係数の評価 (下線付きは機器に応じて変わるもの)

- ・ $F_s$  推定機能維持確認済加速度を中央値として、HCLPF値は中央値の 1/1.2 倍と仮定
- ・ $F_\mu$   $\equiv 1.0$  (弾性範囲内で誤動作が生じることが否定できない)
- ・ $F_{SS}$  基準地震動ターゲットスペクトルと一様ハザードスペクトル(UHS; 地震ハザード評価より得られる)の設計1次固有周期における比
- ・ $F_\delta$  設置床(建屋)の設計及び現実的な減衰定数による基準地震動スペクトルの設計1次固有周期における比
- ・ $F_M$  設置床(建屋)の設計及び現実的な剛性に対応した1次固有周期での基準地震動スペクトルの比
- ・ $F_{NL}$   $\equiv 1.0$  (非線形応答による入力加速度レベルに応じた変動の影響を考慮)
- ・ $F_{ESS}, F_D, F_{EM}, F_{EMC}$   $\equiv 1.0$  (機能維持確認試験の結果に含まれる)

	$F_{EC}$			$F_{SR}$					$F_{ER}$					合計
	$F_s$	$F_\mu$	計	$F_{SS}$	$F_\delta$	$F_M$	$F_{NL}$	計	$F_{ESS}$	$F_D$	$F_{EM}$	$F_{EMC}$	計	
中央値	32.1	1.00	32.1	0.86	1.00	1.00	1.00	0.86	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	27.6
$\beta_r$	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
$\beta_u$	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.15	0.10	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21

③ フラジリティの算定

- ・フラジリティ加速度の中央値  $A_m$ 、ばらつき  $\beta_r$ 、不確定性  $\beta_u$   
 $A_m = F_{total} \times A_{PGA} = 27.6 \times (180/980) = 5.06$  [G]     $\beta_r = 0.18$      $\beta_u = 0.21$
- ・フラジリティ加速度のHCLPF値  $A_{HCLPF}$   
 $A_{HCLPF} = A_m \times \exp[-1.65 \times (\beta_r + \beta_u)] = 5.06 \times \exp[-1.65 \times (0.18 + 0.21)] = 2.66$  [G]





【参 考】

地震PSAの概略結果に影響を与える設備一覧  
(結果全体に対して影響の大きいものを対象 (FV重要度0.1以上))

(頭打ちなし)

順序	現状ケース I		改造後ケース I	
	全体に対する 寄与割合 (FV重要度)	内 容	全体に対する 寄与割合 (FV重要度)	内 容
1	1.00	セラミックインシュレータ損傷 (0.12G)	1.00	セラミックインシュレータ損傷 (0.12G)
2	0.70	RCWS/海水連けい系トレン チ損傷(0.74G)	0.11	消火系ポンプ機能喪失 (0.12G)
3	—	—	0.10	復水タンク損傷 (0.46G)

( ) 内 : 各設備のHCLPF (95%信頼度5%損傷確率) を示す。

(2σ頭打ち)

順序	現状ケース II		改造後ケース II	
	全体に対する 寄与割合 (FV重要度)	内 容	全体に対する 寄与割合 (FV重要度)	内 容
1	1.00	セラミックインシュレータ損傷 (0.12G)	1.00	セラミックインシュレータ損傷 (0.12G)
2	0.65	RCWS/海水連けい系トレン チ損傷(0.74G)	0.20	消火系ポンプ機能喪失 (0.12G)
3	—	—	0.18	補給水系ポンプ機能喪失 (0.15G)

( ) 内 : 各設備のHCLPF (95%信頼度5%損傷確率) を示す。

FV重要度 (Fussell-Vesely) : 基事象の生起確率を0と仮定したとき、頂上事象の発生確率がどれだけ減少するかを表す指標であり、設備改善効果の確率等に使用され、以下の式で表される。

$$FV = \{P(\text{頂上事象}) - P(\text{頂上事象}/A=0)\} / P(\text{頂上事象})$$

P (頂上事象) : 頂上事象の発生確率

P (頂上事象/A=0) : 基事象Aの生起確率が0の場合の頂上事象の発生確率



プレート境界地震の地震ハザードに関する課題

プレート境界地震の地震ハザード評価では、敷地に対して支配的な大きな影響を与え、かつ切迫性のある地震については以下の課題を有する場合がある。

- ① 地震ハザード曲線は、特に地震動データが不足する大振幅の領域において、現時点では地震動のバラツキとして中小振幅のデータに基づく知見（耐専スペクトルによる地震動の対数標準偏差で0.53程度、頭打ちなし）を外挿して用いざるを得ないことにより、信頼性の乏しい過大なものとなるおそれがある。
- ② 地震の発生確率が高い切迫地震（高頻度のプレート境界地震で、前回の地震から長期間経過したとされる場合など）に対する地震ハザード曲線は、地震発生確率が前回の地震から経過年数により上昇し、年々厳しい値となり、上記の地震動のバラツキに関する現時点の知見によれば、非現実的な値となる場合がある。  
(添付資料参照)

上述する課題への対応として、切迫地震における地震動のバラツキの低減・頭打ちの導入検討が必要である。

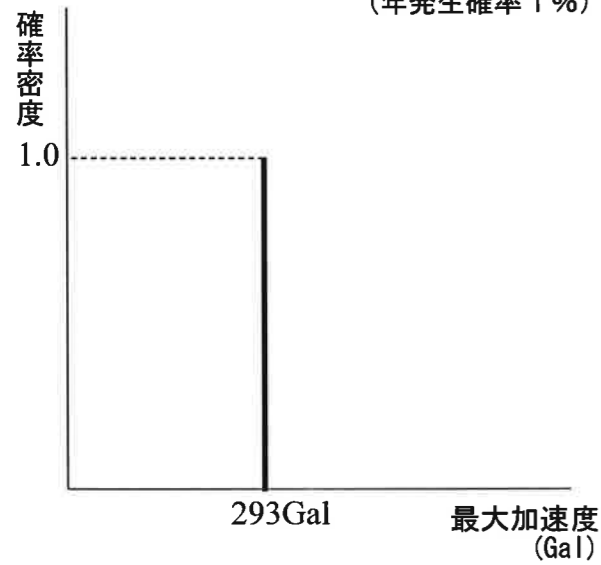
なお、その他、切迫地震に対する地震P S A評価においては、地震の発生頻度によらない別の評価手法、その判断目安の設定等が必要と考える。

以上

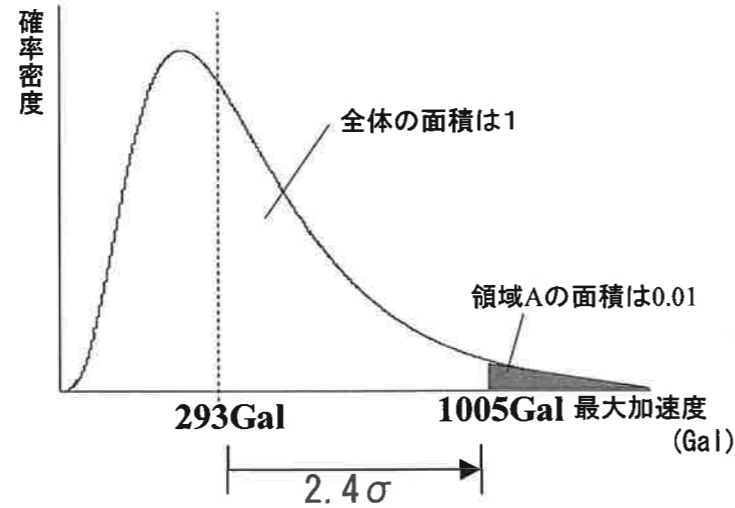
# 東海地震による地震ハザード曲線と地震動のばらつきの関係

- 地震ハザード曲線では、特定の年超過確率における地震動の値は、地震の発生確率が高くなるほど、その地震の際のより低確率の地震動（分布の大きい方の裾）に依存する値となる。
- 地震動のばらつきは、大きな地震動レベルでは小さいとの認識が以前よりあるが、データ不足により、中小の地震動レベルのデータによる値が一律に用いられている。
- したがって、東海地震のように発生周期が短いプレート境界地震のうち、前回の地震から長期間経過し、地震の発生確率が上昇したとされる切迫地震に対しては、地震動のばらつきに関する現在の知見（対数標準偏差で0.53程度、頭打ちなし）によれば過大評価となる可能性があり、ばらつきの低減・頭打ちの導入が課題となっている。

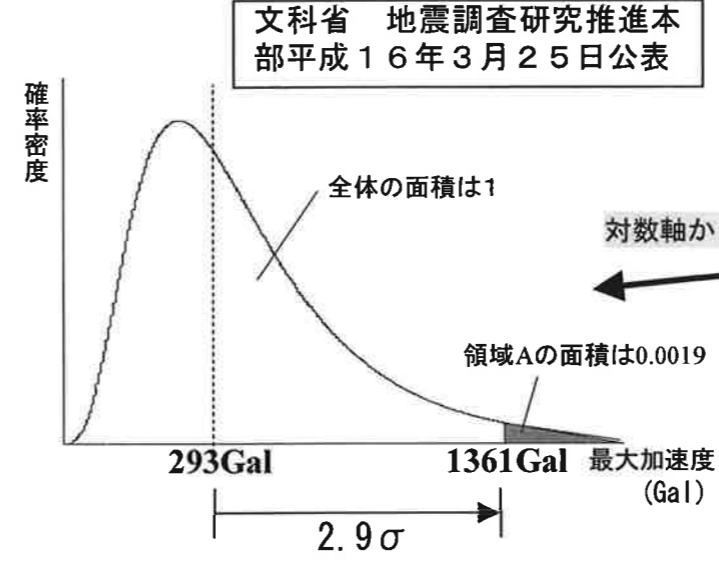
＜地震動のばらつきが無い場合＞  
（東海地震が100年に1回と仮定）  
（年発生確率1%）



＜地震動のばらつきがある場合＞  
（東海地震が100年に1回と仮定）  
（年発生確率1%）

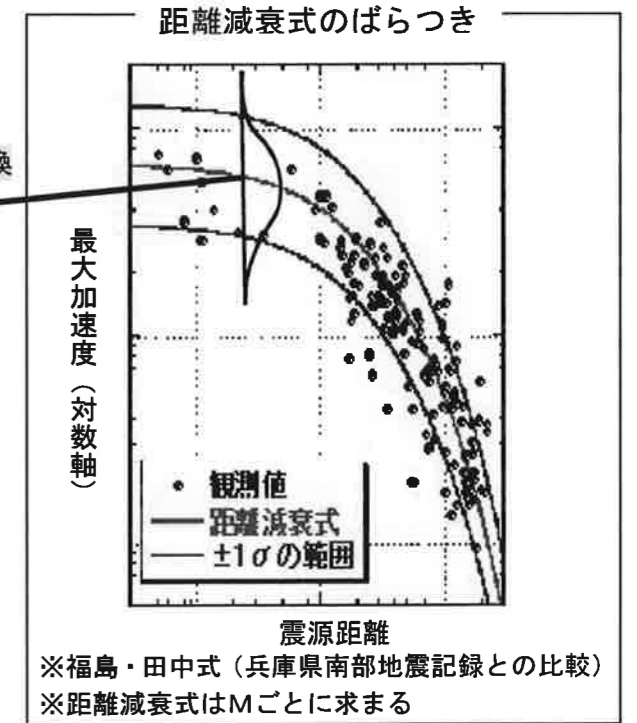


＜地震動のばらつきがある場合＞  
（東海地震が18年に1回に相当（年発生確率5.33%））

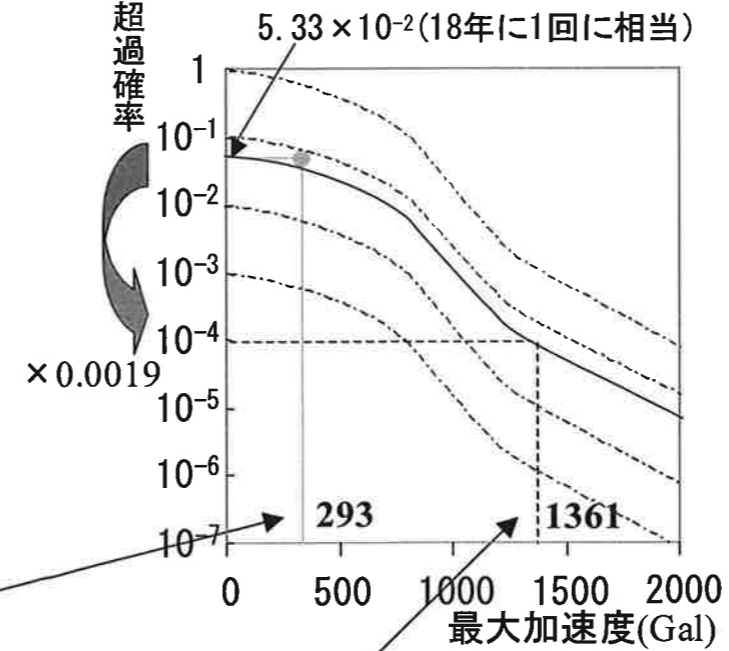
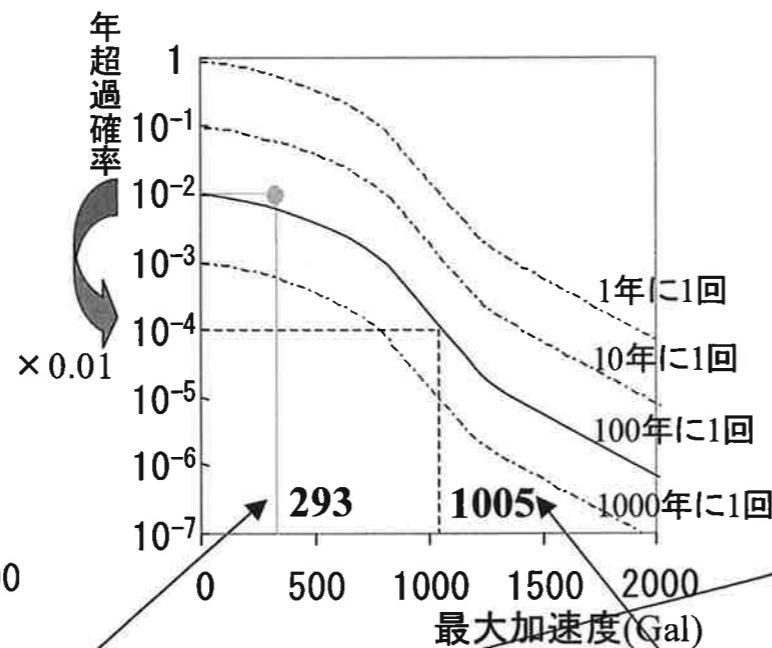
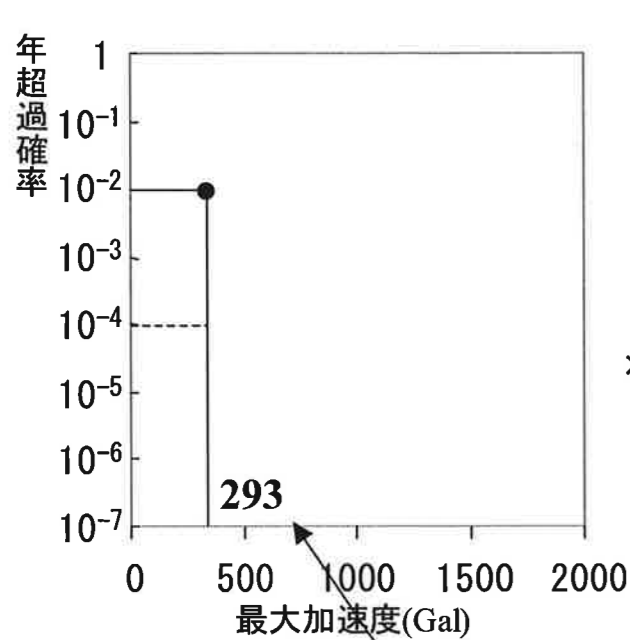


文科省 地震調査研究推進本部  
平成16年3月25日公表

↑2004年における発生確率

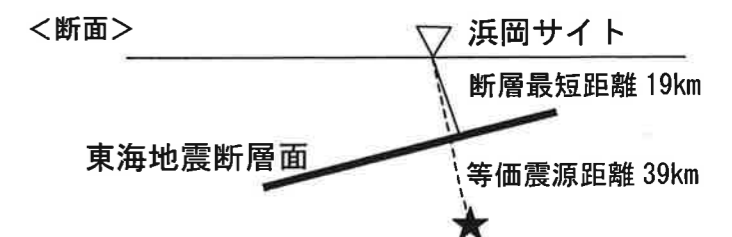
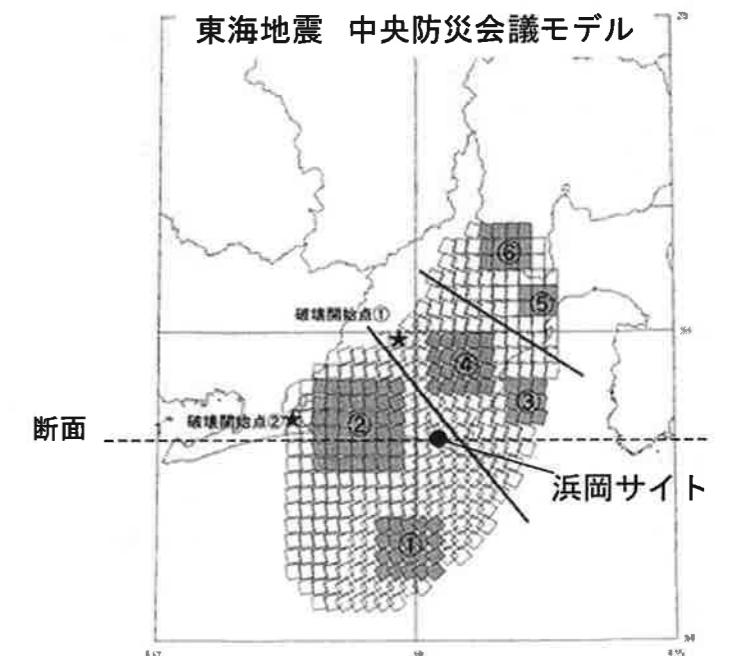


※福島・田中式（兵庫県南部地震記録との比較）  
※距離減衰式はMごとに求まる



合理化の目標値

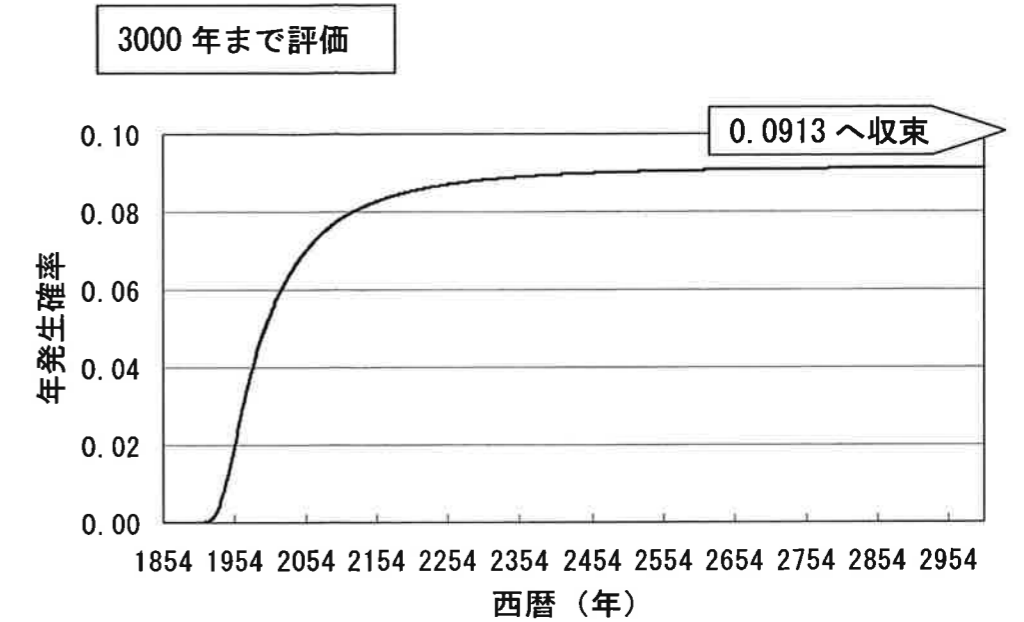
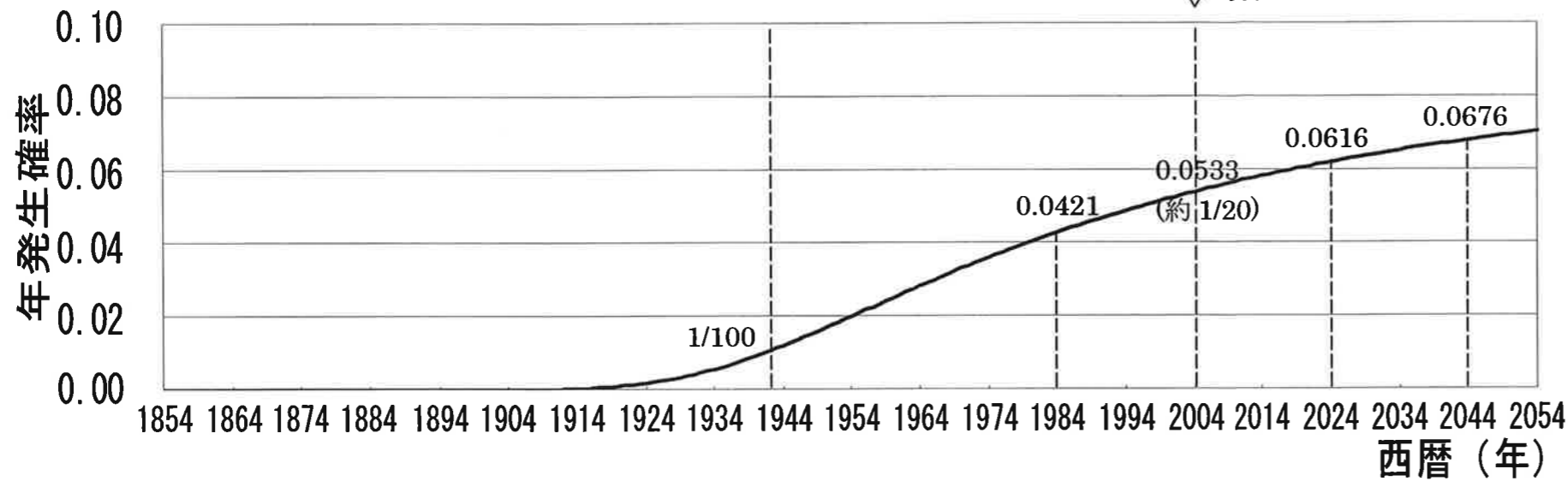
耐専スペクトルのばらつき	中央値 【50.0%】	中央値+1σ 【15.9%】	中央値+2σ 【2.3%】	(中央値+2.4σ) 【1.0%】	(中央値+2.9σ) 【0.19%】	中央値+3σ 【0.13%】
対数標準偏差0.53	293 Gal	498 Gal (1.69倍)	846 Gal (2.89倍)	1005 Gal (3.44倍)	1361 Gal (4.65倍)	1437 Gal (4.9倍)



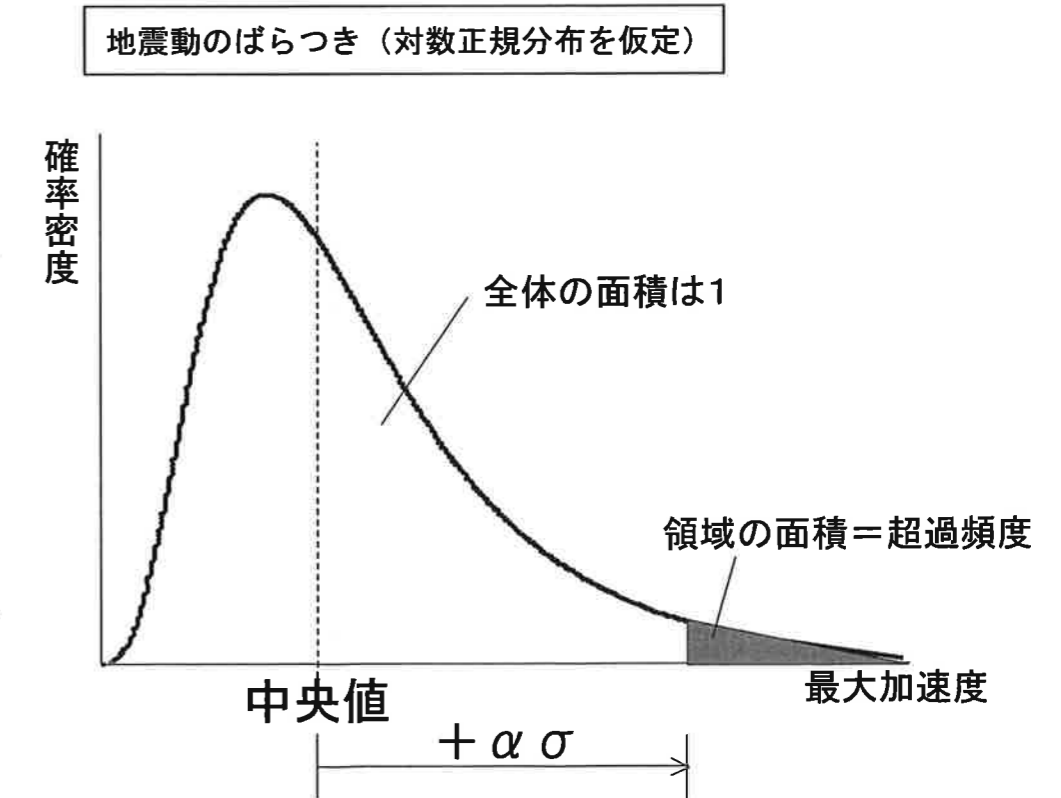
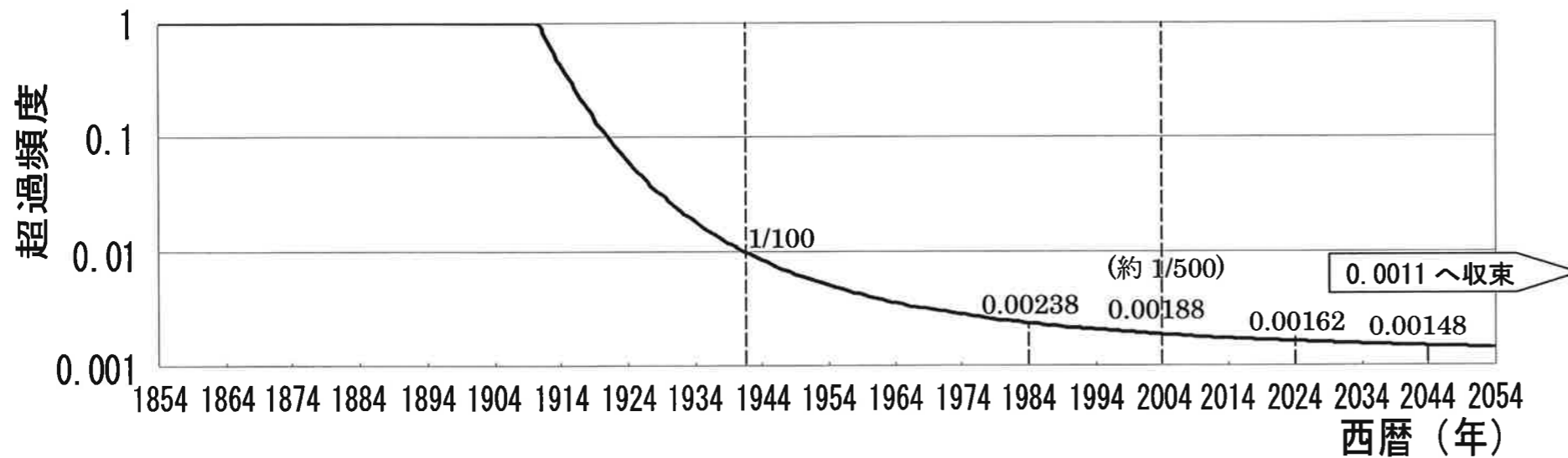
# 東海地震の発生確率の経年変化と $10^{-4}$ の年超過確率に相当する地震動レベル（概算）

- 想定東海地震の発生確率は、国（文部科学省地震調査研究推進本部（以下、推本））により評価されておらず、推本の全国版確率論的地震動予測地図の試作版（西日本試作版、平成16年3月25日公表）において、前回の地震は1854年安政東海地震であり150年近く経過しているとの仮定により算出されている。
- 推本のモデルに基づく概算によれば、2004年時点の想定東海地震の年発生確率は5%以上となり、 $10^{-4}$  の年超過確率に相当する地震動レベルを耐専スペクトル（ばらつき：対数標準偏差で0.53、頭打ちなし）により計算すると1361ガル（中央値+2.9σに相当）となり、地震が発生せずに時間が経過するとさらに上昇する。

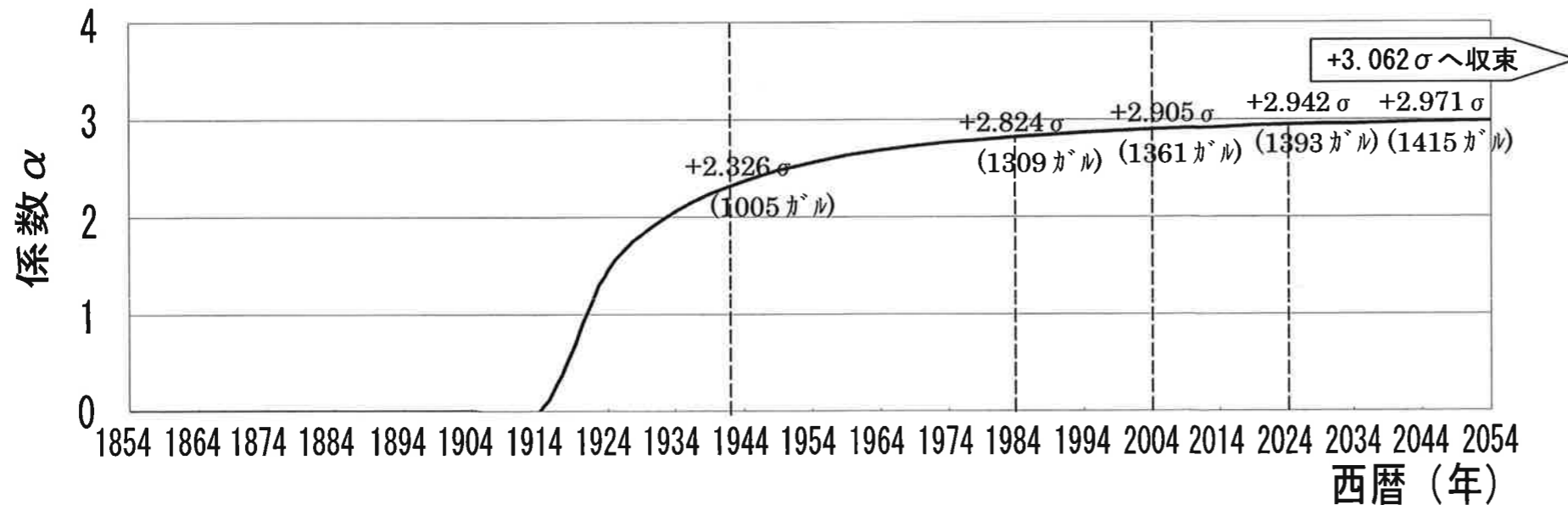
## ● 文部科学省地震調査委員会のモデルによる東海地震の年発生確率



## ● $10^{-4}$ の年超過確率に相当する地震動の超過確率（地震1回当たり）



## ● 耐専スペクトルにおいて、ばらつきを対数正規分布で仮定した時、中央値+ασに該当するか

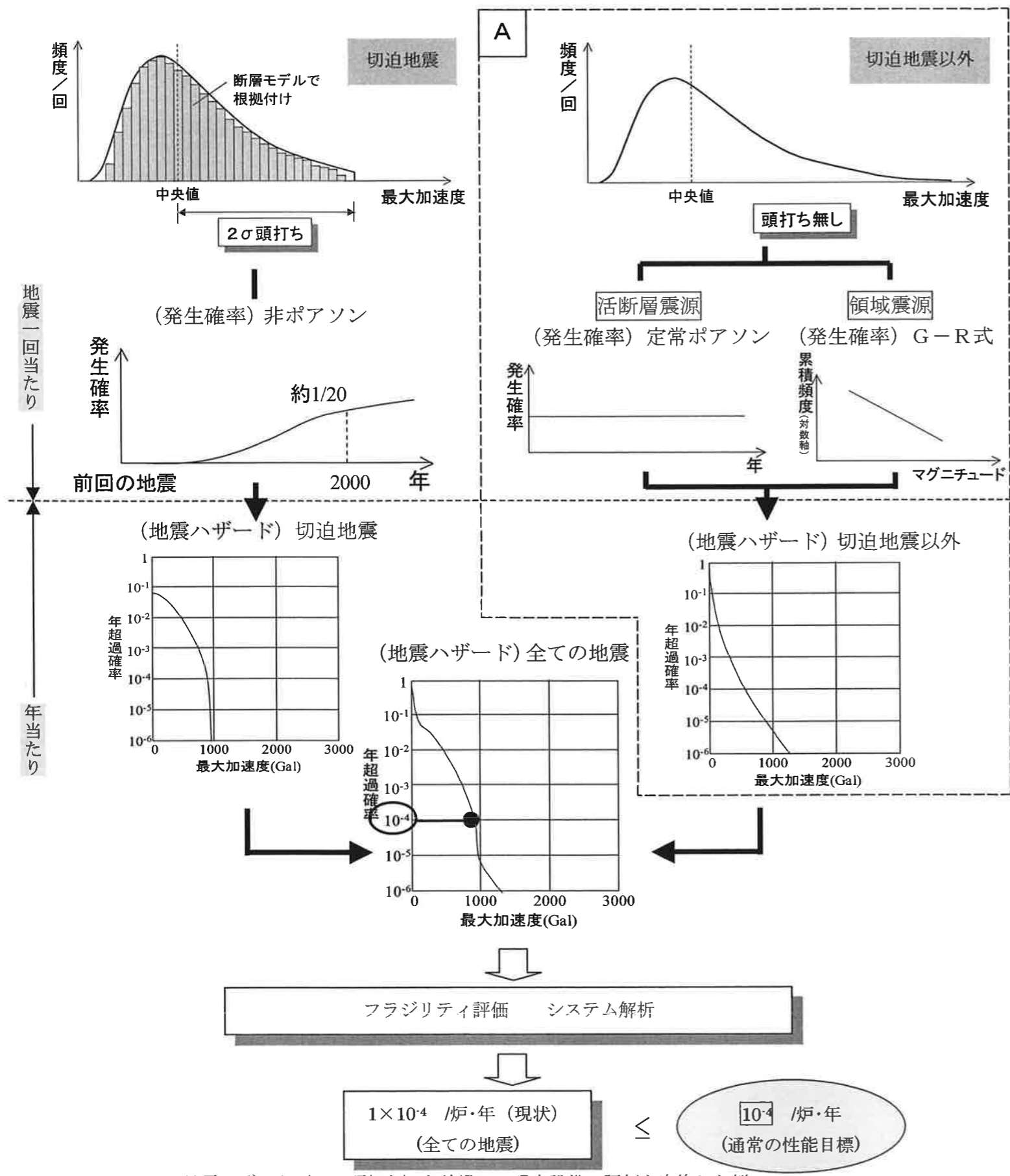


※中央防災会議モデルにおける耐専スペクトルによる浜岡地点での評価（中央値）は293Gal

# 切迫地震について地震の発生を前提とした地震PSAの考え方

- 地震PSAでは、プレート境界地震のうち、敷地に対して支配的で大きな影響を与え、かつ周期的に切迫性のある地震については、地震ハザードを年超過確率で与える場合、地震の年発生確率が高くなるにつれて、その地震のより低確率の地震動（確率分布の大きい方の裾）に依存することになり、地震ハザードは年々上昇し、それに伴い炉心損傷確率も大きくなる。
- 想定東海地震については、非ポアソンの地震発生時系列モデルによる発生確率の評価には困難があるとされている。そこで、切迫地震に対する、地震の年発生確率に依存しない別の評価手法と判断目安の考え方を、以下に示す。

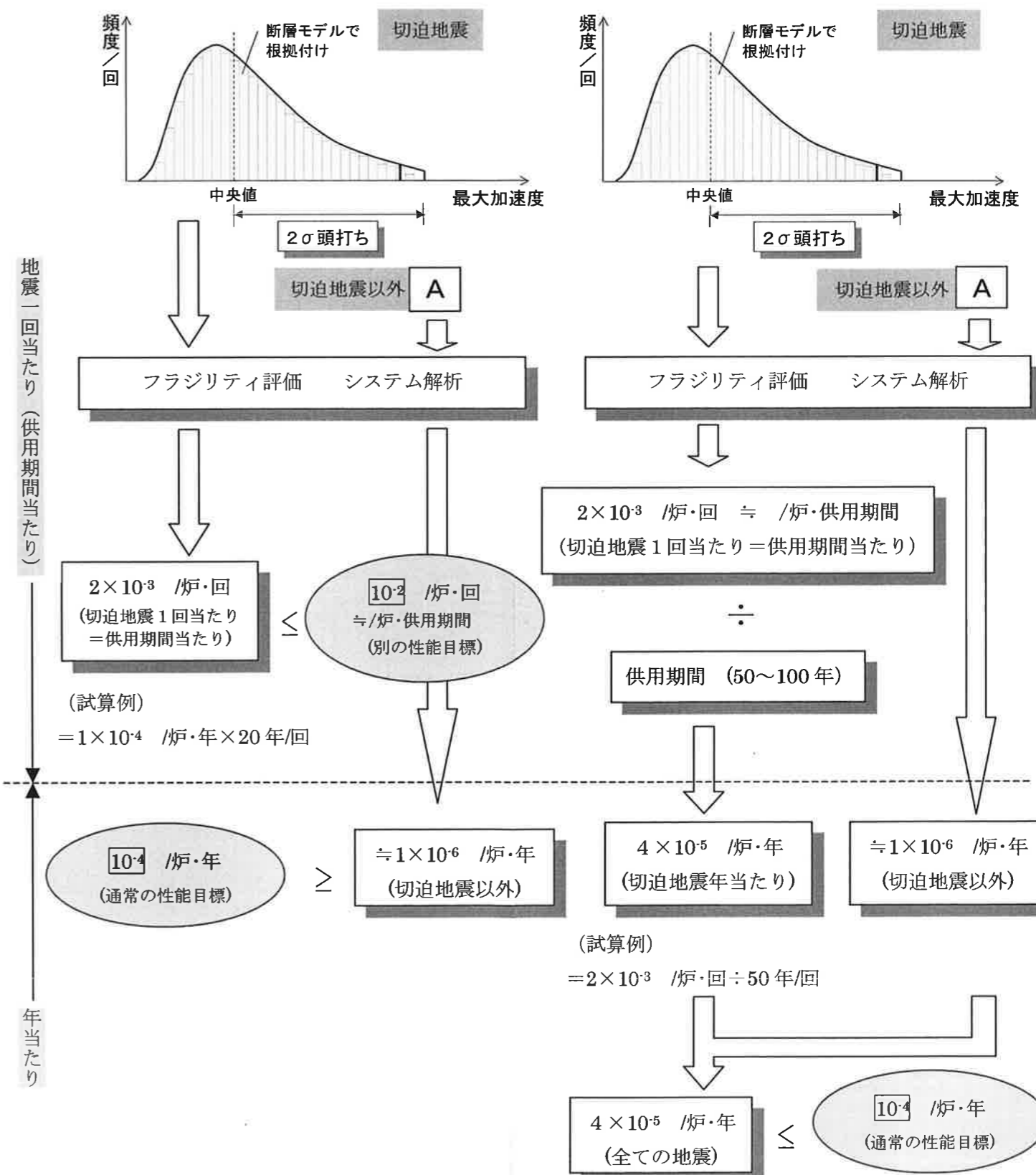
## 1 切迫地震の発生確率を非ポアソンで考慮する地震PSA（現行評価手法） （今後制定されるであろう炉心損傷頻度の性能目標との比較）



地震ハザード（2σ頭打ち）を前提に、現有設備の評価を実施した例

## 2 切迫地震の発生を前提とする評価（案）

- 2-1 切迫地震は別の条件炉心損傷確率の性能目標の設定が必要
- 2-2 切迫地震は供用期間当たりの条件付炉心損傷確率を基に年当たり換算し、炉心損傷頻度の性能目標との比較





## 浜岡における確定論的な安全余裕評価のための地震動の検討例

<はじめに>

浜岡では、想定東海地震が敷地へ支配的な影響を持ち、かつ、切迫性のある地震となっている。

想定東海地震については、中央防災会議により想定震源域が公表され地震動評価が行われている。中央防災会議により計算された敷地における地震動は、大部分の周期帯（長周期のピークの一部を除く）で浜岡発電所の基準地震動S1を下回っており、基準地震動S2はこれに対しさらに大きな裕度をもっている。

想定東海地震のばらつきを考慮し、安全機能確認用地震動（Ss）を超える裕度確認用地震動の仮定として、以下の案が考えられる。

## ①耐専スペクトルのばらつきを考慮した検討例

中央防災会議から示された想定東海地震の震源断層面に基づき、耐専スペクトルにより東海地震の地震動を計算し、中央値からのばらつき（1～2σ）を考慮し、嵩上げを行い、裕度確認用の地震動を仮定することが考えられる。

参考として安全余裕を示す定量的表現を示すと、下表に示すように、例えば、ばらつき2σ程度の地震動を考慮した場合、中央値から約2.9倍の地震動となり、地震動の超過確率は約2%に相当する。

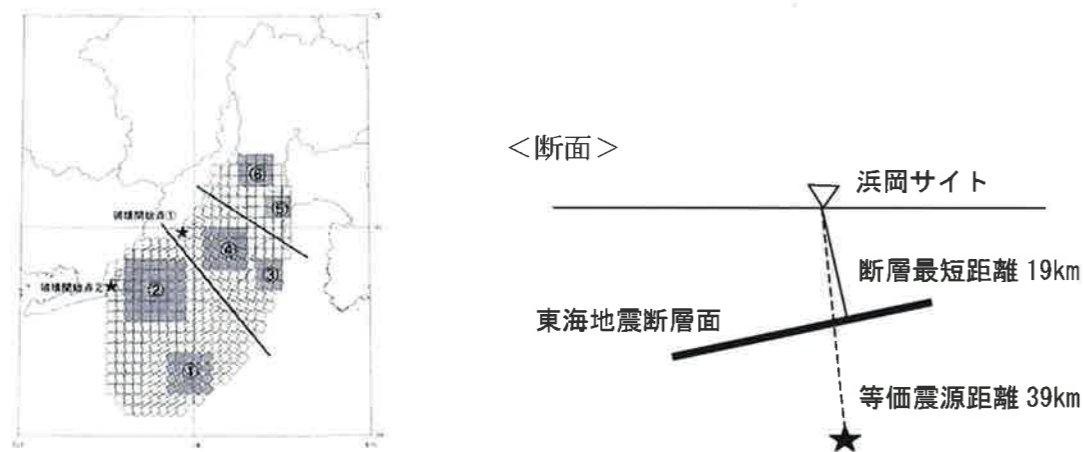
<参考>

東海地震の耐専スペクトルによる地震動

(ばらつき対数標準偏差0.53、頭打ちなし)

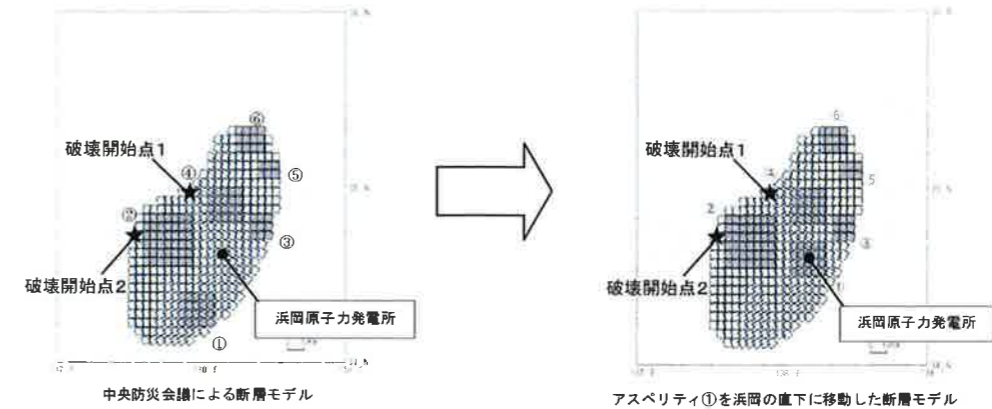
	加速度	中央値に対する倍率	地震動超過確率
中央値	293 Gal	1.00 倍	50.0%
中央値+1σ	498 Gal	1.70 倍	15.9%
中央値+2σ	846 Gal	2.89 倍	2.3%
中央値+3σ	1437 Gal	4.9 倍	0.13%

<中央防災会議 想定東海地震モデル>



## ②断層モデルのパラメータの設定においてばらつきを考慮した場合

中央防災会議の想定東海地震では、断層モデルにおいてアスペリティが設定（右上：左図）されている。裕度確認用の地震動として右図に示すようにアスペリティの位置などにばらつきを考慮し、厳しい条件とした検討を行うことが考えられる。



■ : アスペリティ（震源域のうち、特に大きな地震動を発生させる部分）

<浜岡での裕度確認のための検討用地震動例>

