

原子力発電所の地震に対する 確率論的リスク評価手法

電力中央研究所 原子力リスク研究センター

研究参事 中島 正人

E-mail: masato@criepi.denken.or.jp

土木学会 水工学オンライン連続講演会

2025年 7月 24日

 電力中央研究所

プレゼンテーション内容

1. 地震PRAの概要・地震ハザード評価・地震 fragility 評価

- | | |
|-----|-----------------|
| 1.1 | 地震PRA手法の概要 |
| 1.2 | 確率論的地震ハザード評価 |
| 1.3 | 地震 fragility 評価 |

2. 米国の地震PRA・関連最新成果

- | | |
|-----|---|
| 2.1 | 米国における地震PRA規制ガイドライン
NUREG RG 1.208 |
| 2.2 | リスクベースの地震動評価／規制ガイドライン
NUREG RG 1.208 |

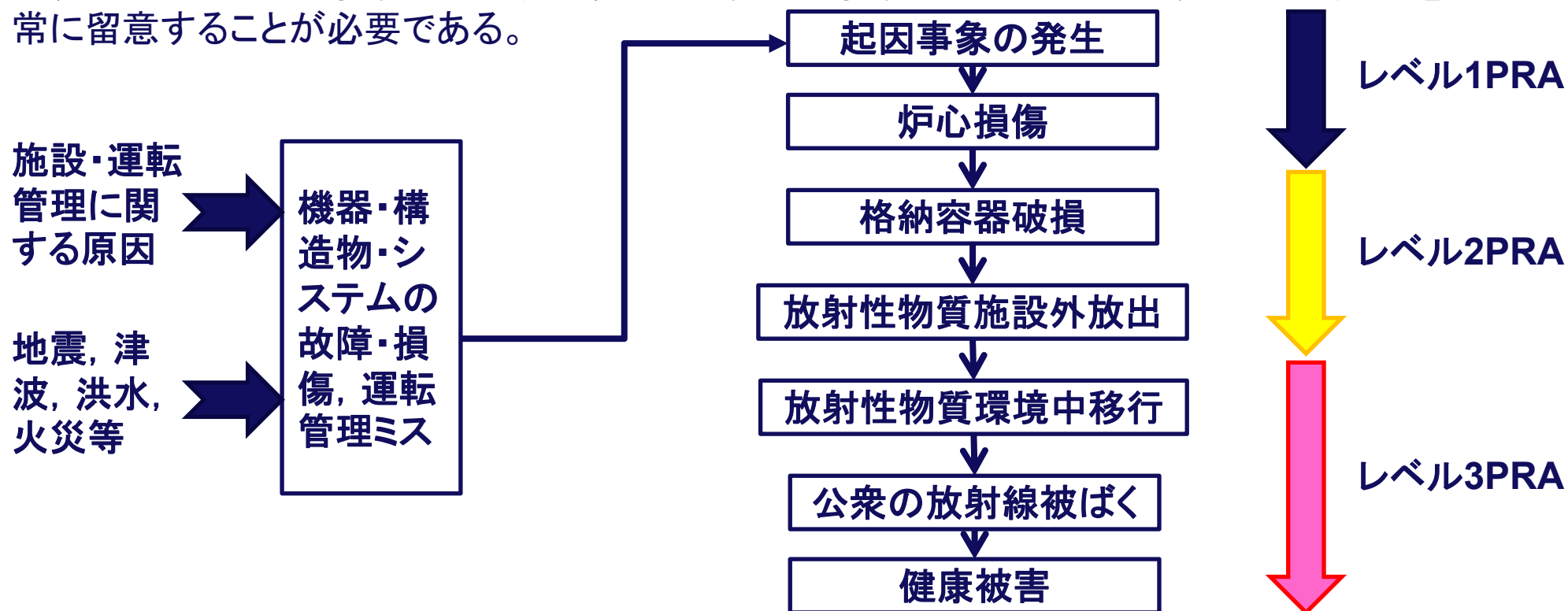
3. まとめ

1.1 地震PRAの概要

確率論的リスク評価 (PRA)

確率論的リスク評価 (PRA: Probabilistic Risk Assessment)とは、原子力発電所施設等で発生する事故を対象として、その発生頻度と発生による影響を定量評価することで、**リスクの大きさ**を表現する手法。

元々は機器故障など内的事象に対して開発されて手法で、外的事象にも拡張されている。地震・津波など外的事象に適用する場合には、内的事象よりも大きな不確実性が伴うことを常に留意することが必要である。



耐震重要度分類と地震PRA

■耐震重要度分類

原子力発電所の施設の耐震設計上の重要度を、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点から、施設の種別に応じて分類したもの。

➤ Sクラス^{注)}

地震により発生するおそれがある事象に対して、原子炉を停止し、炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設、自ら放射性物質を内蔵している施設、当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設、これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し、放射線による公衆への影響を軽減するために必要な機能を持つ施設、これらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設及び地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設であって、その影響が大きいもの。

➤ Bクラス^{注)}(タービン建屋、廃棄物処理建屋等)

安全機能を有する施設のうち、機能喪失した場合の影響がSクラス施設と比べ小さい施設をいう。

➤ Cクラス^{注)}(補助建屋、ろ過水タンク、軽油タンク、開閉所、タービン設備、発電機、変圧器等)

Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設をいう。

地震PRAでは、内的事象PRAをベースに評価する地震動レベルで機能維持のcreditが取れる、基礎地盤・斜面、建屋・構築物、設備・機器をFault Treeでモデル化

注) 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈(原規技発第1306193号(平成25年6月19日原子力規制委員会決定)第4条解釈中2に規定されている耐震重要度分類より一部抜粋)

地震PRAを実施するために必要な要素

➤ 地震ハザード評価

- 対象地点に将来影響を与える可能性がある地震による地震動(揺れ)と発生頻度(起こり易さ)の関係を評価

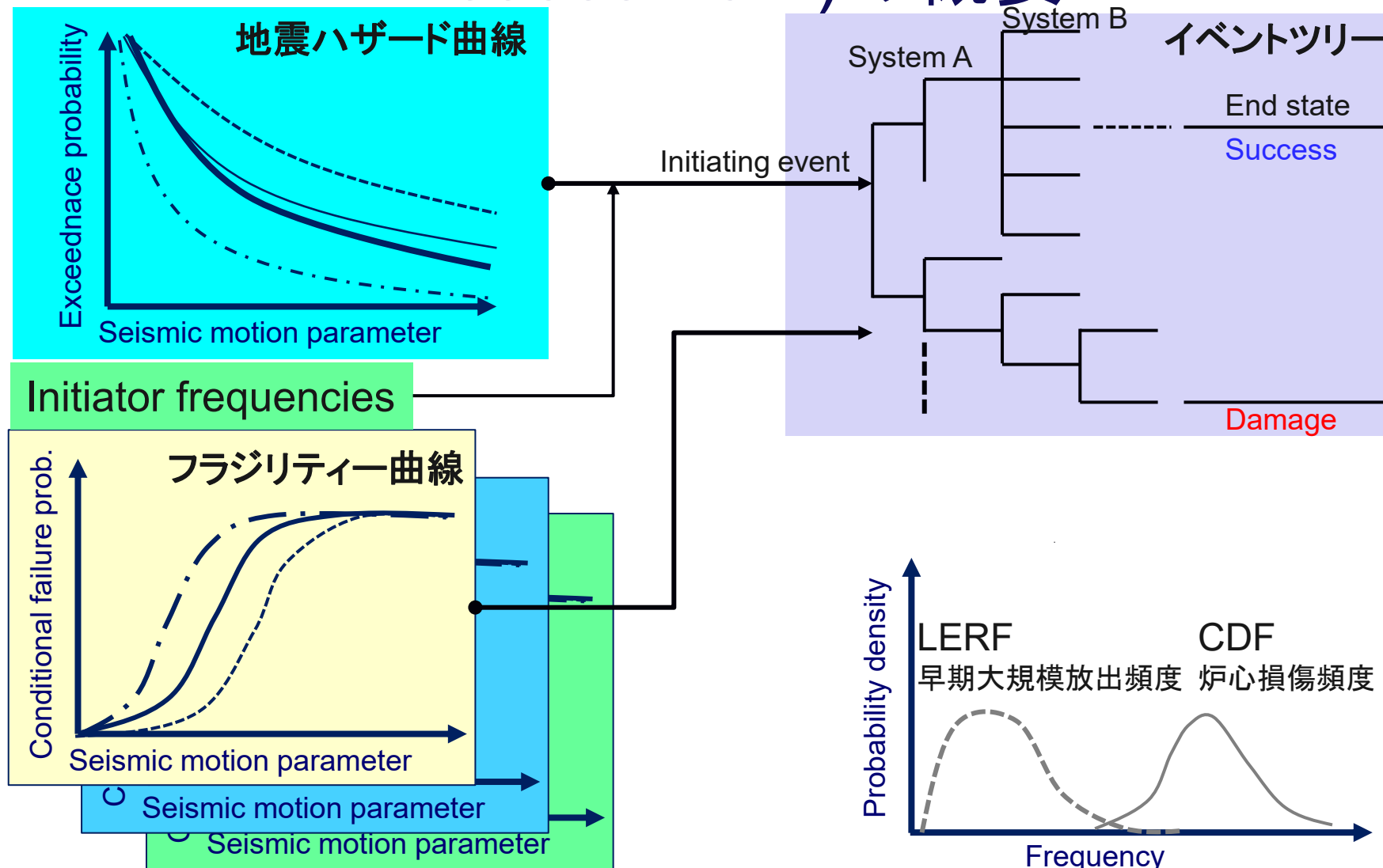
➤ 地震フラジリティ評価

- 地震による揺れの強さと、発電所の機器・構築物が損傷する／機能を失う、条件付き損傷確率を評価

➤ 事故シーケンス評価

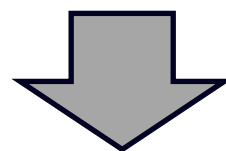
- 地震の揺れの大きさ毎に、発電所の安全上重要な機器・構築物及び設備・機器が機能を失った場合の影響(事故シナリオ)と炉心損傷の発生頻度を評価

地震PRA (Seismic Probabilistic Risk Assessment)の概要



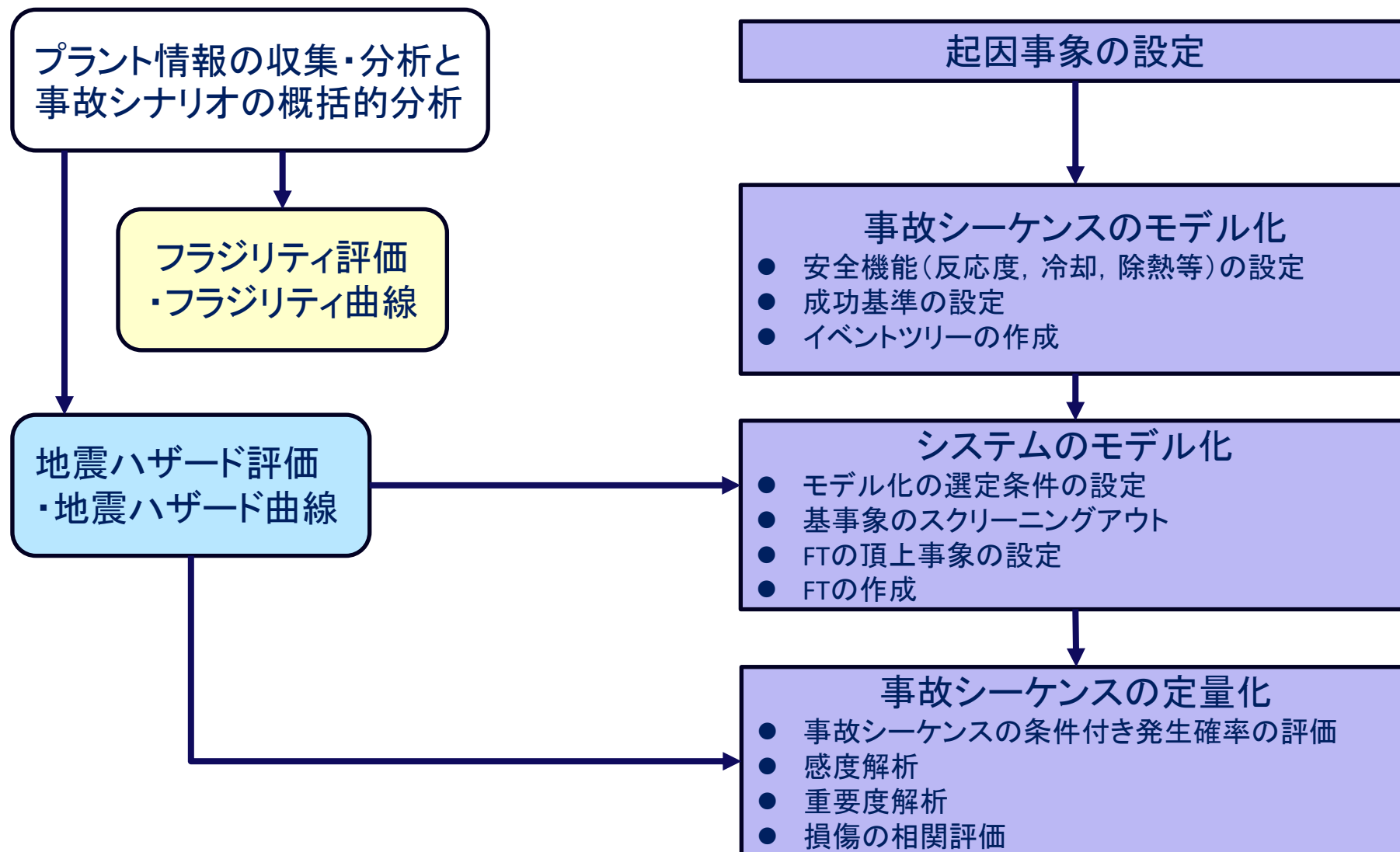
地震リスクの定量的評価の目的・必要性

- 網羅的なシナリオに対する脆弱部位の抽出→補強（リスク低減）
- 地震以外の事象に対しても総合的に定量的なリスク評価を実施（リソースの最大効果的な投入）



原子力発電所を対象に、地震に対する対策・方針を、リスク情報に基づき決定する際に非常に重要・有益な情報を得ることが可能となる。

事故シーケンス評価の概要



1.2 地震ハザード評価

入力地震動評価

◆ 確定論的評価

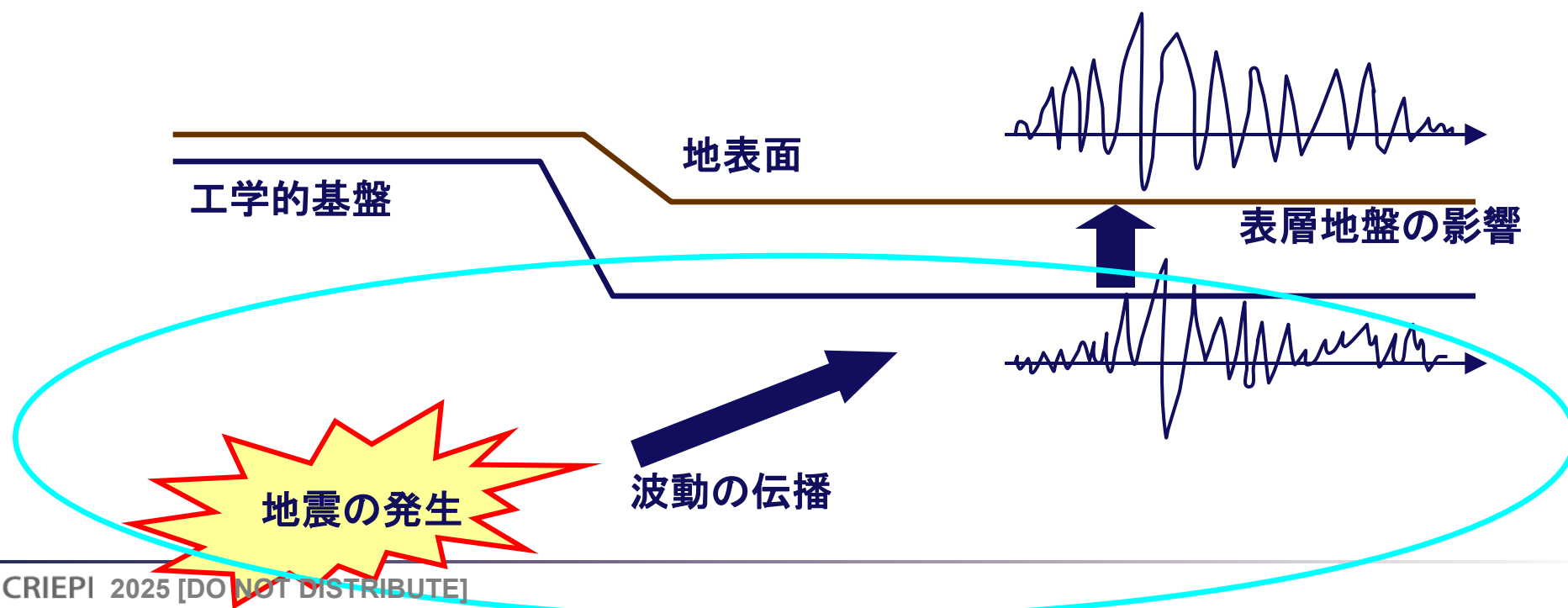
- 既往の強震記録
- 応答スペクトル
- シナリオ地震に基づく詳細な地震動評価

◆ 確率論的評価

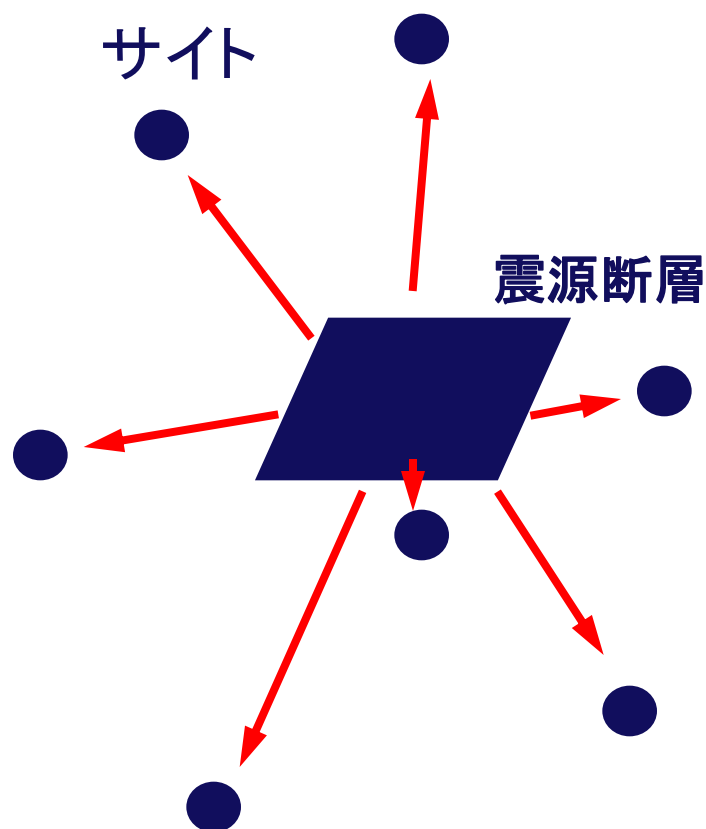
- 地震ハザード評価
- 確定論的評価におけるバラツキ、誤差評価

確率論的地震ハザード解析

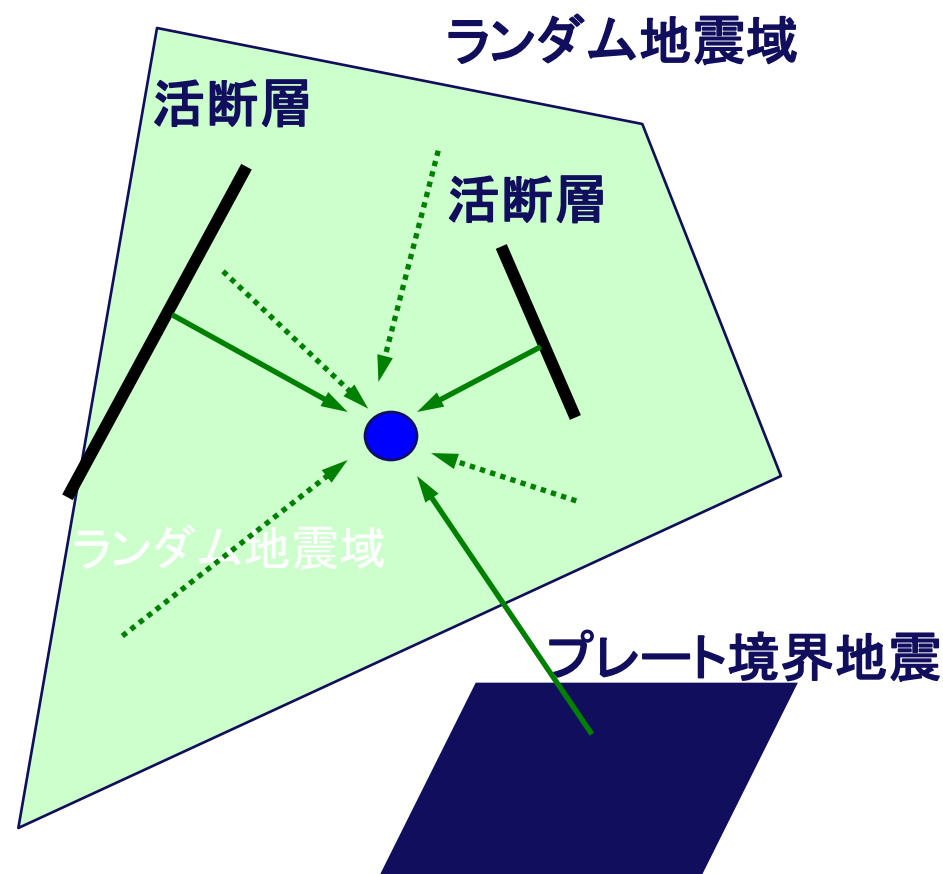
- ◆注目地点に、**将来の一定期間内に**来襲することが推測される地震動の諸性質を、起こり易さを示す**確率論的指標との関連**で評価すること



確率論的地震ハザード解析の特徴



シナリオ地震に基づく強震動予測



確率論的地震ハザード解析

外部ハザード評価と故障率評価の違い

➤ 故障率評価

- 例えば機械・電子部品のように工場生産される人工工作物は、品質が管理されており、規格値に適合しない製品は工場出荷の段階で取り除かれる。
母数が $10^4 \sim 10^5$ あるものもあり（母集団の統計的性質）は（サンプルの統計的性質）はほぼ一致する／差を定量化できる（検定可能）。
- 上記を言い換えると、中心極限定理が強く成立することを意味しており、それに基づく確率モデルが構築できる。
 - 上記故障率を用いてハザード関数から計算

➤ 外部ハザード評価（例として地震，津波）

- 規模が大きいもののほど発生数が少なく，高地震帯の日本であってもM7クラスが 10^2 のオーダー，M8クラスは 10^1 のオーダーである。
- （母集団の統計的性質）と（サンプルの統計的性質）には差（バイアス）がある。
- 地震発生については，計器観測（数十年），歴史地震（約1500年），トレンチ調査（数万年）からその発生頻度を求めるが，古い年代・規模が大きな地震になればなるほどその信頼度は低くなる。
- 強震記録（地震記録）については，1996年兵庫県南部地震以降に，全国的な地震計観測システムが整備された。→よって約25年間

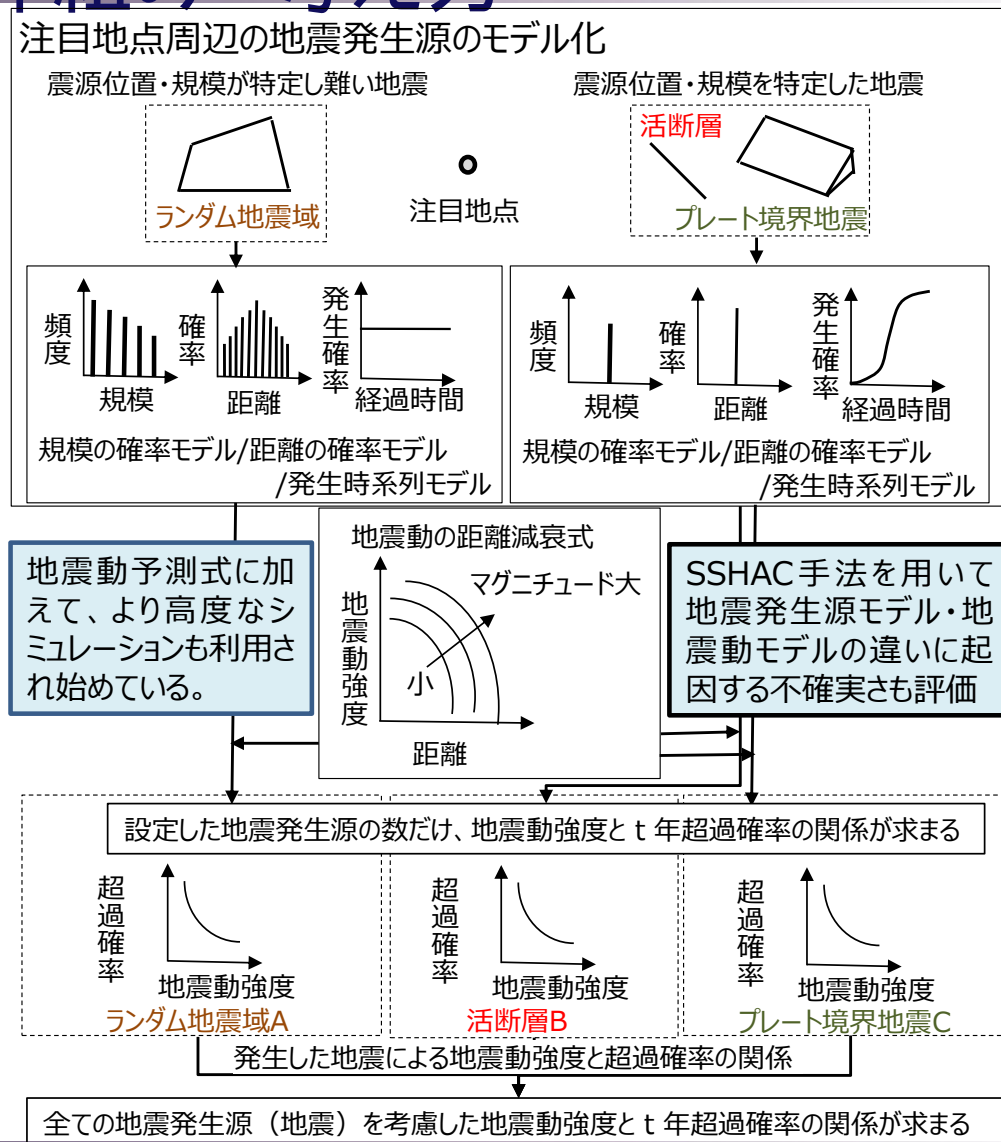
地震を対象とした確率論的地震ハザード解析の 基本的枠組み・考え方

■ 目的

対象地点で将来の一定期間内に来襲する外部ハザードの大きさ(強さ)とその起こり易さ(超過確率)の関係を評価すること

■ 頻度と確率

- 地震発生率($n/\text{年}$)などのパラメータは、過去の地震発生記録に基づき統計量として計算される。
- 地震発生確率は、地震発生率をパラメータの一つとする地震発生時系列モデル(確率モデル)に基づき「将来 T 年間の地震発生確率の変動(変化)」を求める。



地震ハザード解析で扱う不確定性

◆ 震源に関する不確定性

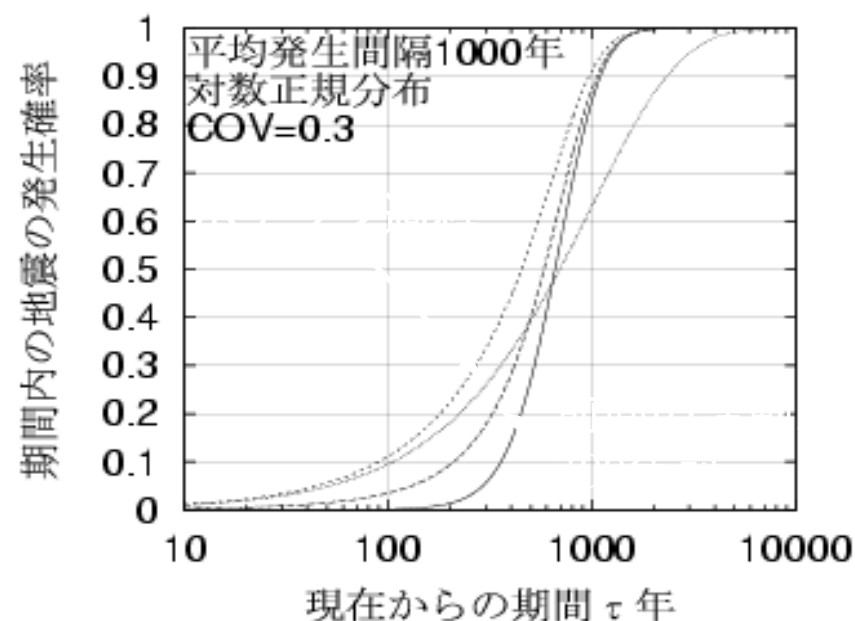
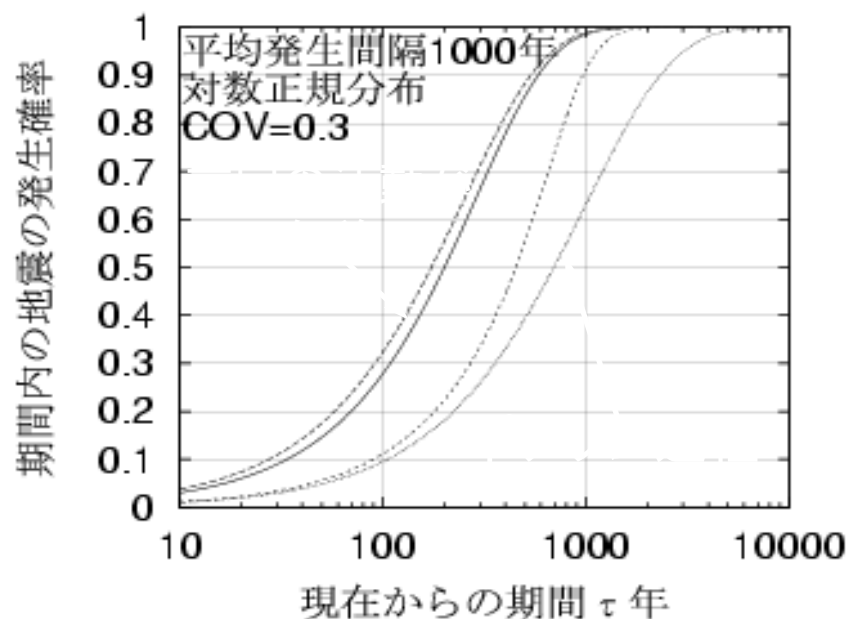
- 位置・形状
- 地震活動度
- 地震発生の時系列

◆ 地震動予測に関する不確定性

- 伝播経路
- サイト特性

地震の発生時系列モデル

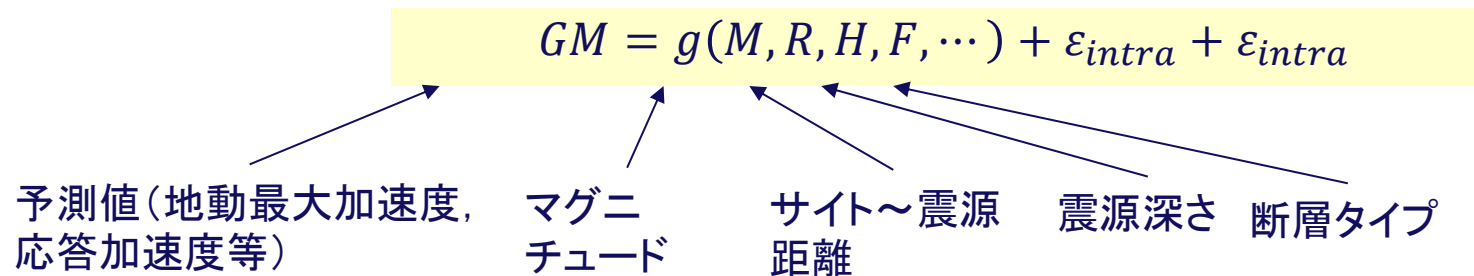
◆地震発生時系列のモデル化



過去の活動履歴に関する情報がある地震発生源については、発生時系列を更新過程でモデル化することが可能・必要

地震動予測式

- 地震動予測式 (**G**round **M**otion **P**rediction **E**quation: GMPE)は、マグニチュードや震源距離などを説明変数として数式で表現される。
- 観測記録に基づき回帰分析(正しくは2段階回帰)を行い、式の各項目の変数および残差を求める。
- 日本では地震学・地震工学の研究者が職人的に開発する例が多いが、米国ではNGAプロジェクトなどで最新知見を反映した複数の式が準定期的に開発されている。



最新の地震動予測式の例(ASK2014)

$$\begin{aligned} \ln S_A(g) = & f_1(\mathbf{M}, R_{RUP}) + F_{RV} f_7(\mathbf{M}) + F_N f_8(\mathbf{M}) + F_{AS} f_{11}(CR_{JB}) \\ & + f_5(\widehat{S}a_{1180}, V_{S30}) \\ & + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_1, V_{S30}) + Regional(V_{S30}, R_{RUP}) \end{aligned}$$

地震動強度の年超過確率(1)

例えば, 内陸地殻内で発生する地震の場合,

- ①地震の規模と発生位置は地震毎に異なる(空間的に変動)
- ②発生間隔がランダムである(時間的に変動)

時間軸上での起こり方が②の場合, その時間発生間隔は**ポアソン過程**に基づき確率モデル化される。

その場合, その地震が今後 t 年間で発生する平均回数は以下の式で計算される。

$$P(x; t) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} \exp(-\lambda t)$$

x : 時間(区間) t における地震の発生回数
 λ : 単位時間あたりの地震の平均発生回数

地震動強度の年超過確率(2)

対象地点において地震動強度 Y が1年間にある値 y を越える確率(年超過確率)は次式より算出される。

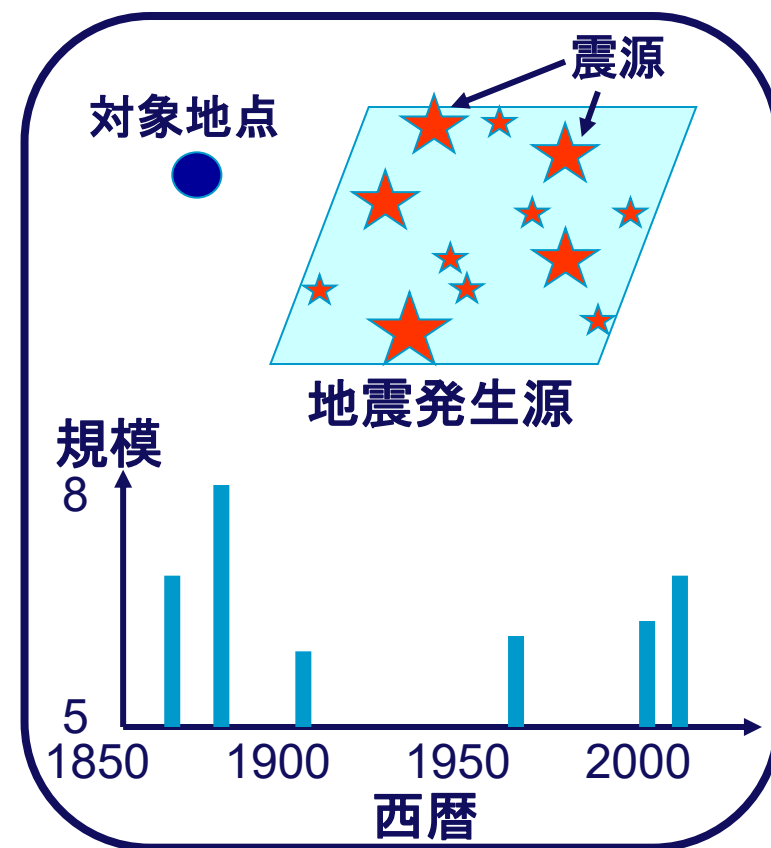
■ 仮定: 地震発生源で発生する地震の発生時系列はポアソン過程に従う, 発生位置はランダムである。

$$P(Y > y; t = 1) = 1 - \exp \left\{ - \sum_{k=1}^n v_k \times q_k(Y > y) \right\}$$

n : 地震発生源の総数

v_k : 地震発生源 k における地震発生率

$q_k(Y > y)$: 地震発生源 k で発生する地震により, 対象地点における地震動強度 Y が y を越える確率



地震動強度の年超過確率(3)

地震動強度の超過確率 $q_k(Y>y)$ は次式で計算される。

$$q_k(Y > y) = \int_{m_0}^{m_{\text{uirui}}} \int_{r_{\text{li}}} [P(Y > y | m, r) f_R(r)] f_M(m) dm dr$$

$f_R(r)$

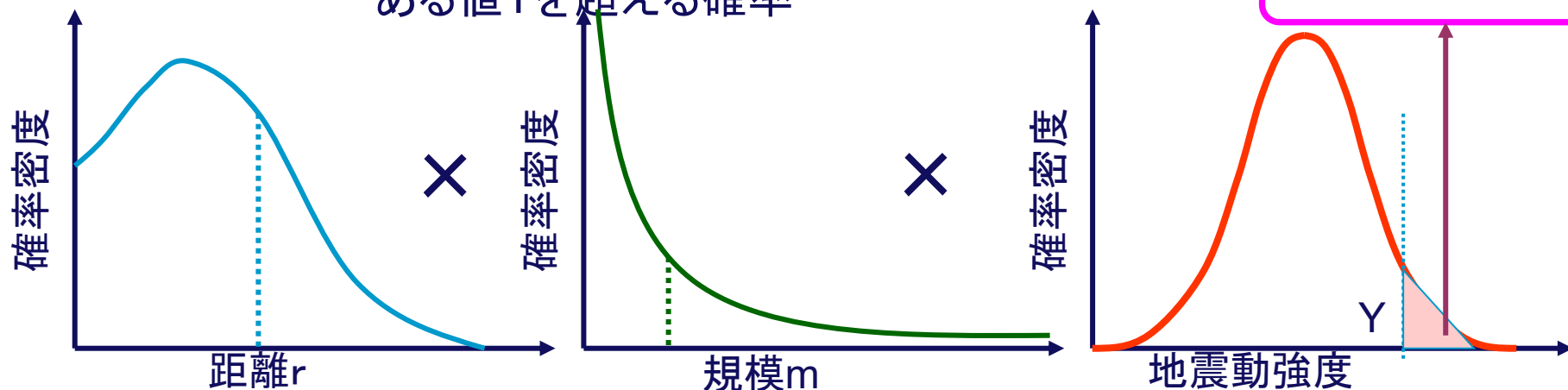
対象地点と震源の距離の確率密度関数

$f_M(m)$

震源の規模(マグニチュード)の確率密度関数

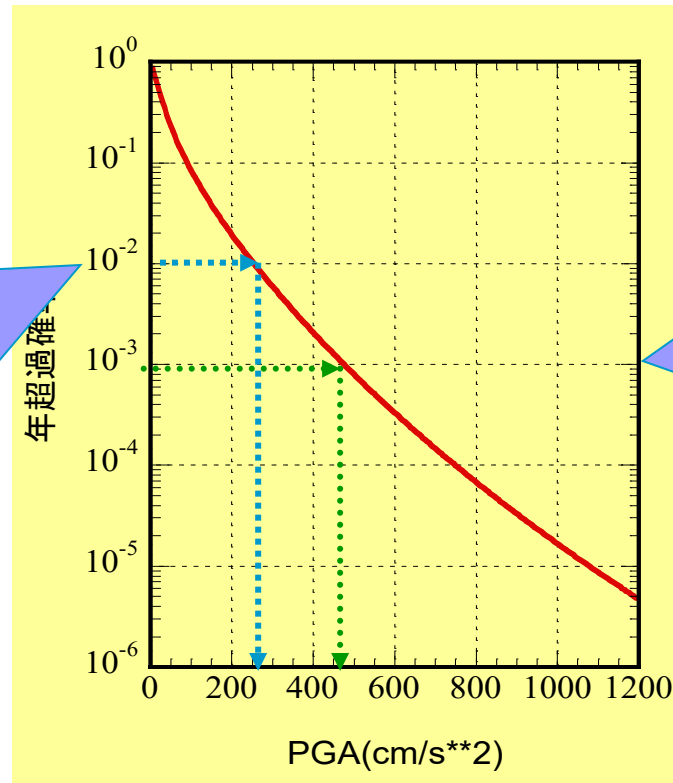
$P(Y > y | m, r)$

規模 m , 距離 r の地震による地震動強度 y がある値 Y を超える確率



地震ハザード曲線

年超過確率 10^{-2} (再現期間100年相当)
に対応するPGAは約
250Gal



年超過確率 10^{-3} (再現期間1000年相当)
に対応するPGAは約
460Gal

対象地点で想定される地震動強度を、対象期間に応じて評価できる！

1.3 地震フラジリティ評価

構造信頼性理論の歴史

信頼性理論の誕生 (1920's~1945)

Mayer(1926)
Khostialov(1929)
コンクリート強度のばらつき

構造設計理論の見直し (1945~1950's)

Rzhanitsyn
Muller
安全率の確率論的考察
極値分布の導入

信頼性理論の発展 (1960~1970's)

Freudenthal
時間概念の導入

二次モーメント法の登場 (1970~1980's)

Cornell (1969)
Ditlevsen
Hasofer and Lind (1974)
安全性指標 β

実システムへの適用 (1980's~)

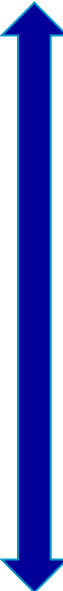
Shinozuka, Vanmarcke
Shueller
大規模計算
ライフライン信頼性解析

新しい手法の開発 (2000's~現在)

Grigoriu
Ghanem
非正規確率場の理論

構造信頼性解析と設計水準

■一般的には、レベル2&3を信頼性解析と呼ぶことが多い。



レベル3	破壊モードに対する真の破壊確率を多重積分に基づき厳密に求める。	全ての不確かさが考慮され、真の破壊確率が得られる。	・不確かさに関する完全な情報が必要
レベル2	破壊モードに対する性能関数の平均値、標準偏差に基づき、破壊確率と安全性指標を求める。	不確かさを考慮して、破壊確率を比較的簡単に計算することが可能である。	・近似解法であり厳密ではない(性能関数は正規分布に従うという仮定)。
レベル1	強度変数と荷重変数の公称値を用いて、その値に対する部分安全係数を決め、破壊モードに対する信頼度を求める。	現行の設計法との親和性が高く、実務に用いやすい。	・破壊確率は求められない。 ・真の安全余裕を示しているかは不明。

信頼性解析の基礎理論①

■破壊確率を計算するための定式化

構造物の強度(耐力)を R , 作用する外力(荷重)を S として, 構造物の安全性を以下の性能関数で定義する。

$$Z = R - S \quad \begin{array}{l} Z \geq 0 \cdots \text{安全} \\ Z < 0 \cdots \text{破壊, 破損, 機能損失} \end{array}$$

この性能関数 Z で定義される破壊モードの生起確率は次の式で計算される。

$$P_f = \iint_{Z \leq 0} f_{R,S}(r,s) dr ds = \int_0^\infty \int_0^s f_{R,S}(r,s) dr ds$$

強度 R と荷重 S が互いに独立と仮定した場合, となるので破壊確率は以下の式で計算される。

$$f_{R,S}(r,s) = f_R(r) \cdot f_S(s)$$

$$P_f = \int_0^\infty f_S(s) \{f_R(r) dr\} ds$$

信頼性解析の基礎理論②

破壊確率を求めるための式

$$P_f = \iint_{Z \leq 0} f_{R,S}(r,s) dr ds$$

① 強度R, 荷重Sが正規確率変数の場合

→つまり, 変数R,Sともに正規分布に従う。

性能関数 $Z=R-S$ も正規確率変数となる。この場合破壊確率は以下の式から計算される。

$$P_f = P(Z \leq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \int_{-\infty}^0 \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right\} dz$$

難しそうに見えるが, 電卓と正規確率表があれば誰でも簡単に計算可能!

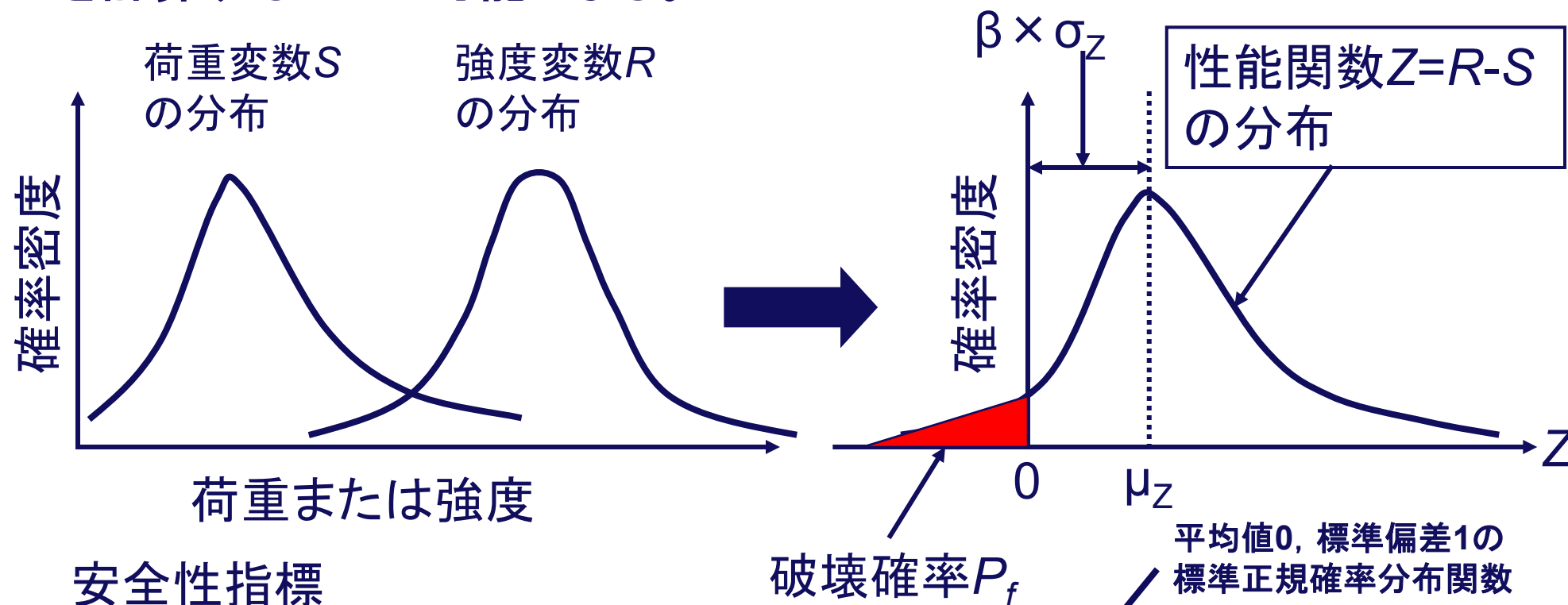
② 強度R, 荷重Sの何れかが非正規確率変数の場合,

性能関数Zは正規確率変数ではないため簡単には計算出来ない。

→1次ガウス2次モーメント法など

安全性指標 β ・破壊確率 P_f

■ 性能関数 Z の平均値 μ_Z と標準偏差 σ_Z を得ることにより, 破壊確率を計算することが可能となる。



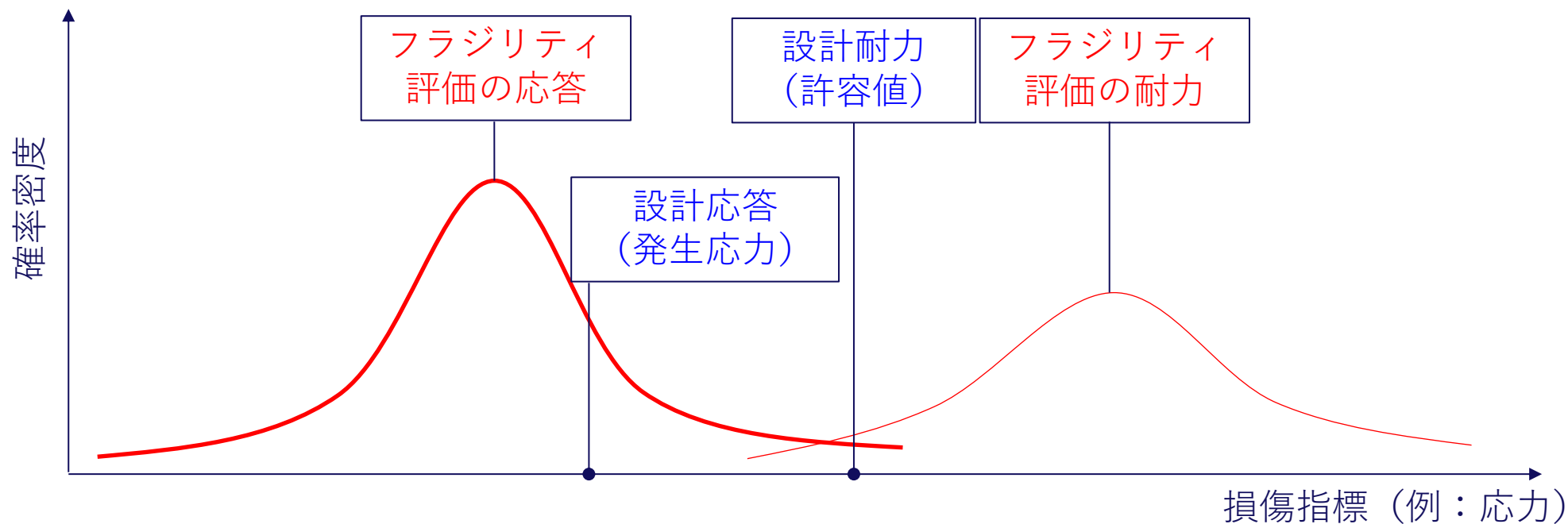
安全性指標

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

破壊確率 P_f

$$P_f = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = 1 - \Phi(\beta)$$

設計とフラジリティ評価の違い



- ・設計では応答や耐力は一意に決まる(決定論)が、フラジリティでは不確実さを考慮するため一意に決まらない(確率論)。
- ・フラジリティ評価では保守性を極力排除し、現実的な応答と耐力を用いて評価する。

応答評価における認識論的不確実さ

◆地震動評価(解放基盤面)

- 基盤表面位置
- 目標スペクトル形状
- 位相特性の評価法

◆地震動評価(構造物への入力地震動)

- 解析モデル, 減衰
- 非線形解析特性(地盤)・解析手法, 復元力特性

◆地震応答評価

- モデル形態
- 復元力特性のモデル化
- 損傷モードの仮定
- 解析手法
- サンプリング手法

評価手法の選択

① 現実的耐力と現実的応答による方法（詳細法）

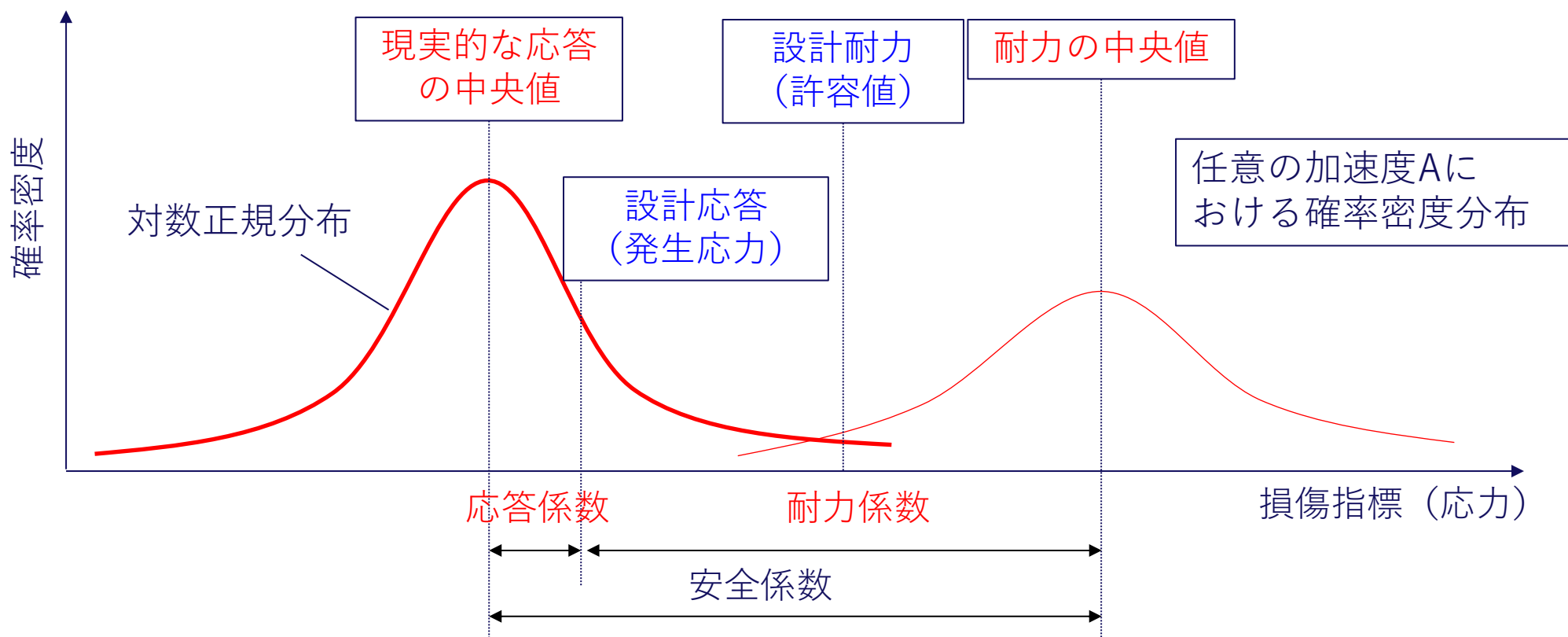
② 現実的耐力と応答係数による方法

③ 耐力係数と応答係数による方法

（安全係数法、Zion法とも呼ばれる。）

- 実機のフラジリティ評価で使われている手法
- 新たに応答解析を実施せずに設計評価結果を基に簡便にフラジリティを評価する。
- 設計応答における保守性，設計裕度及び設計耐力における保守性を取り除いて現実的な評価を行う。

安全係数法



加速度が増加すると応答分布は右にずれる。耐力中央値と応答中央値が一致する加速度が A_m 。

安全係数法の評価式

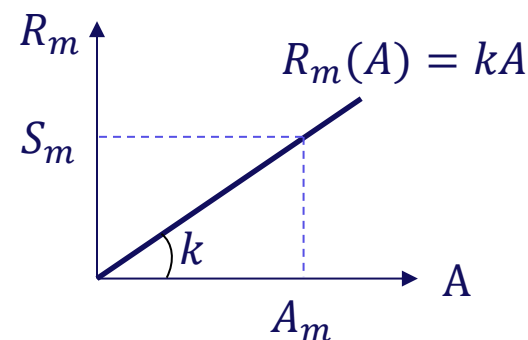
いずれの評価手法でも下式を用いる。

$$F(A) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln(S_m) - \ln(R_m(A))}{\sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2}} \right)$$

【安全係数法の評価式】

$$F(A) = \Phi \left(\frac{\ln(A) - \ln(A_m)}{\sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2}} \right)$$

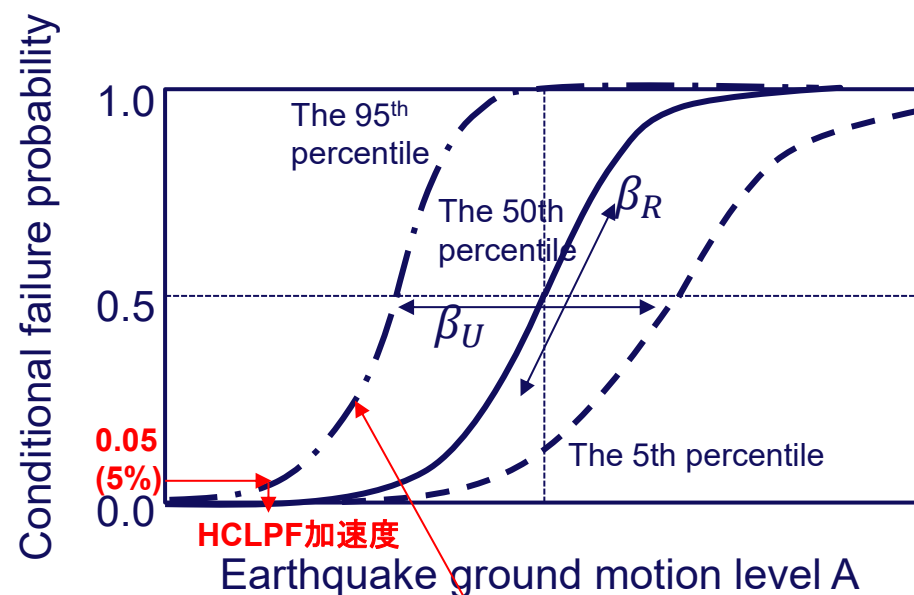
$F(A)$: 損傷確率、 A : 加速度
 $\Phi(\cdot)$: 標準正規確率分布関数
 S_m : 現実的な耐力の中央値
 $R_m(A)$: 現実的な応答の中央値
 β_r : 偶然的不確実さ
 β_u : 認識論的不確実さ
 A_m : 加速度中央値



安全係数法では加速度に対する応答に線形関係を仮定。

地震フラジリティ解析から得られHCLPF加速度

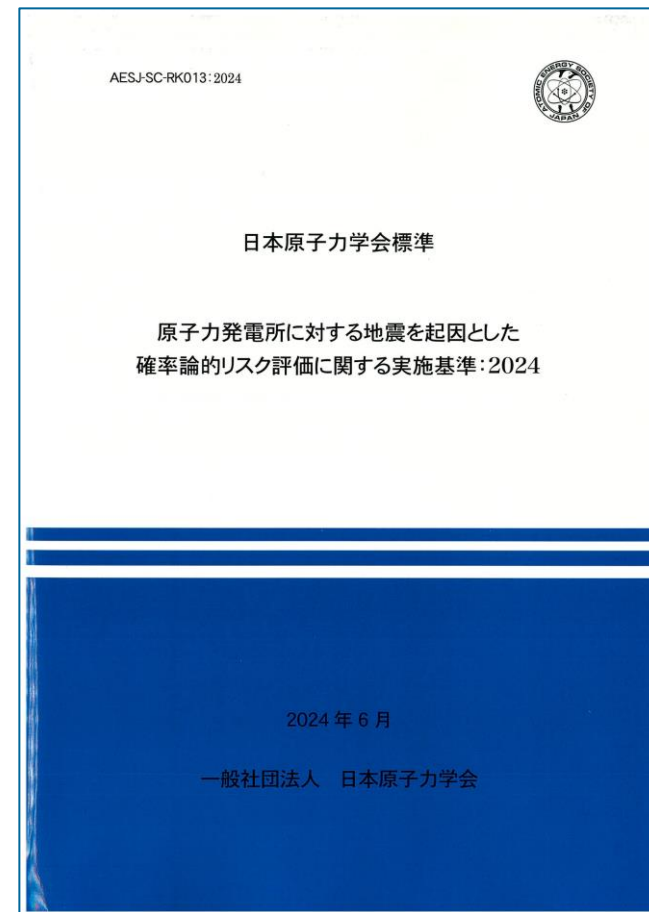
フラジリティ評価では、建屋・構造物・機器・配管などが解放基盤表面位置での地震動の作用に対して損傷する確率を求める。



HCLPF (高信頼度低損傷確率) 加速度:
フラジリティ解析から得られる95%信頼度曲線(高信頼度)に基づき,
5%(低)損傷確率に対応する加速度

我が国における地震PRAの状況

- 我が国では地震PRAは許認可対象ではないが、安全性向上評価届出書において実施されており、事業者(電力会社)が対応している。
- 規格・基準としては、日本原子力学会が地震PRAに関する実施基準*を策定しており、事業者は基本的にはこの基準に則り地震PRAを実施している。
- 並行して、地震PRAに係る課題については、電力会社、電力中央研究所NRRC、メーカーが協働しながら研究開発進めている。



*日本原子力学会:原子力発電所の地震に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準, AESJ-SC-RK013 (2024)

2. 地震ハザード評価に関する 米国の基準・適用例

米国における地震PRA

- 地震PRA手法の基本的枠組みは1990年台に米国で構築され、外的事象に対する個別プラント評価(IPEEE)を通して実機適用された。
- その後、2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、米国原子力規制委員会U.S.NRCが2012年3月12日に布告した10 CFR 50.54 (f) Regarding the Seismic Aspects of Recommendation 2.1 of the Near-Term Task Force Review of Insights from the Fukushima Dai-ichi Accident: Seismic Hazard and Screening Report U.S.NRCによる指示に基づくプラントに対する地震PRA再実施により多数の評価事例が蓄積されている。

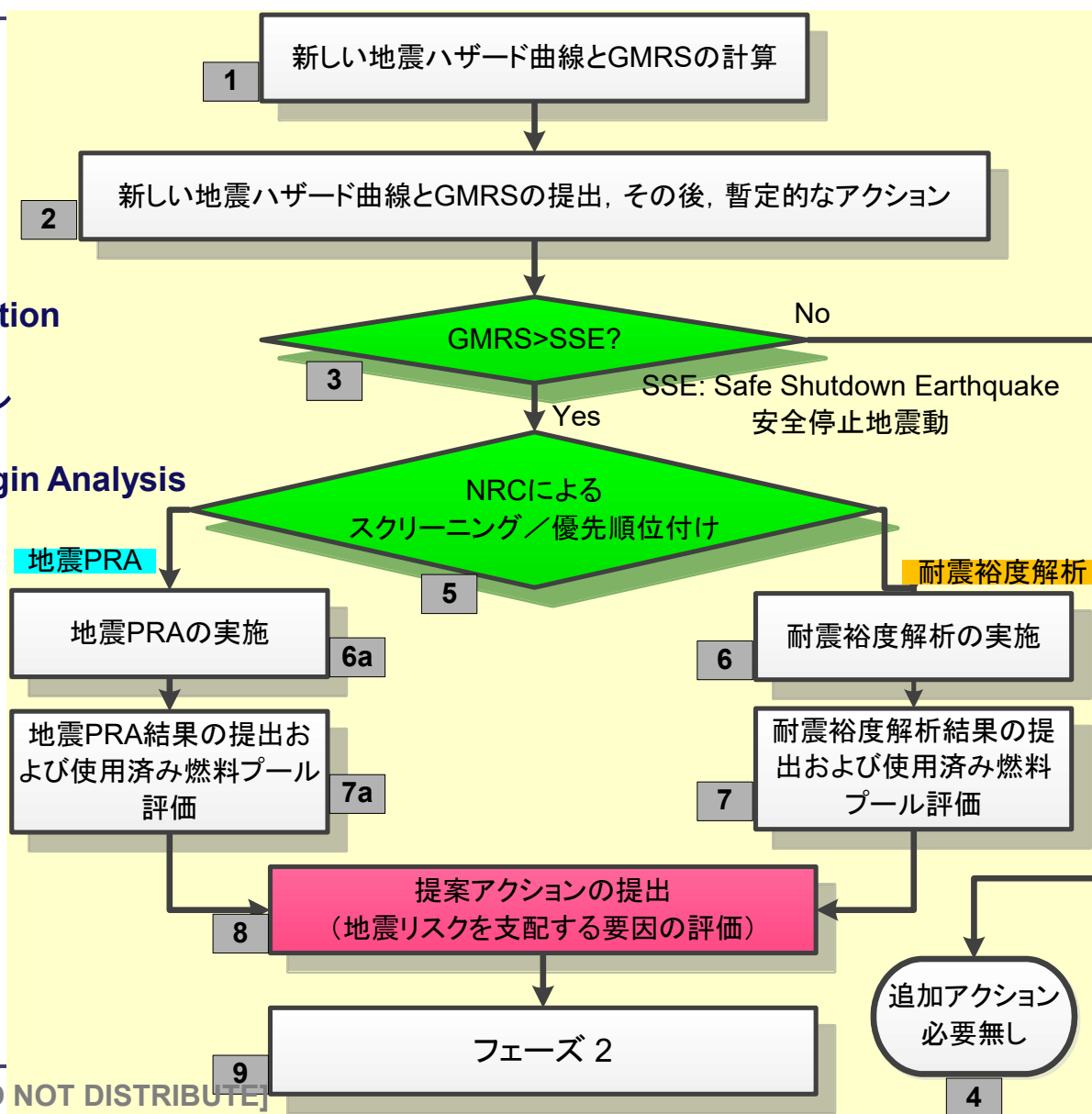
PRAの活用方法【米国での事例】

- 設計・建設段階における利用
 - スペック変更等
- 原子力発電所施設の深層防護能力の評価
 - 外部電源喪失時などの，代替手段の手順化
- 規則作成時のバックフィット評価
 - 規則適用前後での炉心損傷頻度変化を概算して，バックフィットの適用可否を検討
- 発電所個別の許可変更申請
 - リスク情報を活用した許可変更申請における，炉心損傷頻度の変化を考慮

米国の規制における地震PRAの扱い

GMRs: Ground Motion
Response Spectra
地震動応答スペクトル

SMA: Seismic Margin Analysis
耐震裕度解析



10CFR50.54
Figure 1.
Development of
Requested
Information and Its
Use in Regulatory
Analysis

米国原子力における地震動評価の推移

(0)以前は決定論的な手法に基づき
設計用地震動を設定していた。

→Ref. RG 1.60

(1)1990年代より確率論的地震ハ
ザード解析PSHAを積極活用
PSHAにおいてのサイト特性評価
PSHAの拡張としてのハザード再分
解)結果から規定した支配的地震
像からの時刻歴波形の作成

(2)近年は Performance-Basedに
基づき評価した, リスク適合地震動
GMRSの導入も検討している。

→Ref. G1.208

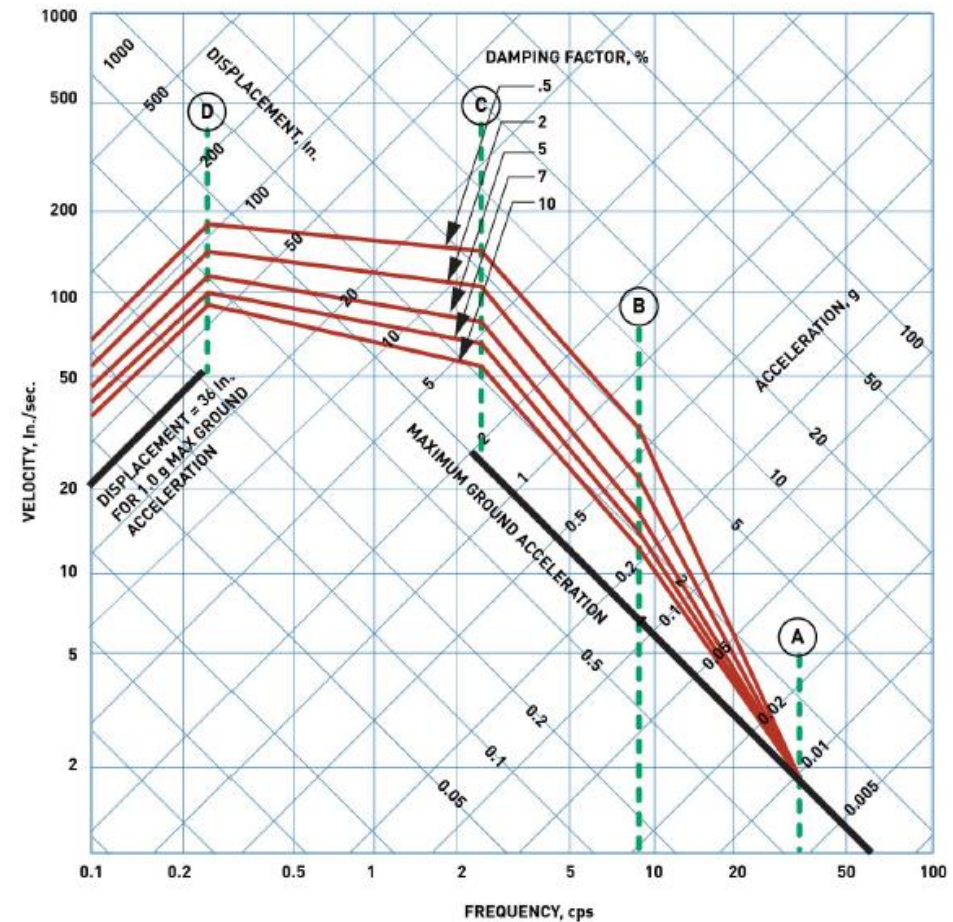
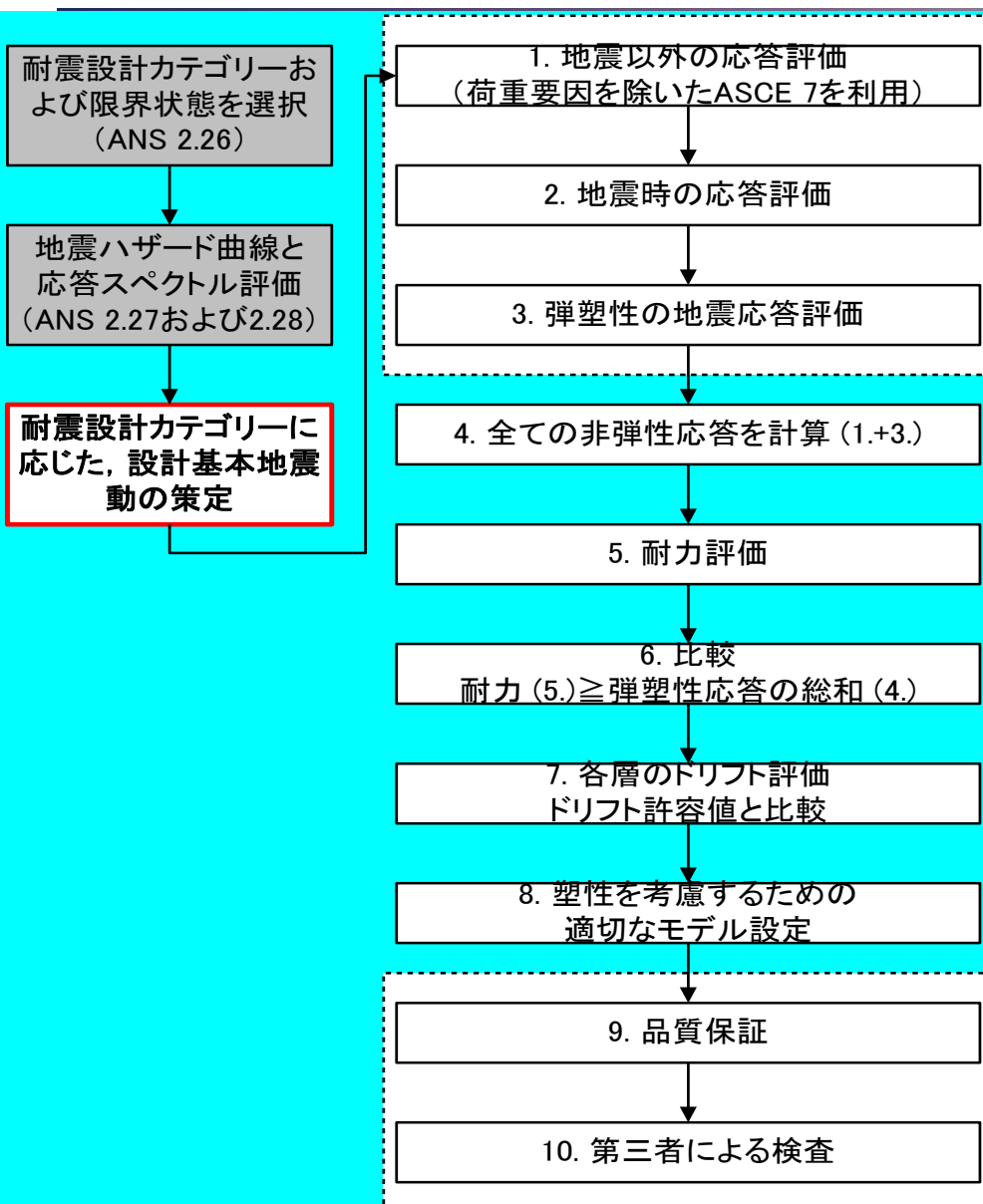


Figure 1. Horizontal Design Response Spectra Scaled to 1 g Horizontal Ground Acceleration

ASCE/SEI 43-05で提案している性能設計



耐震設計カテゴリ (SDC) に対する設計パラメータ

	SDC3	SDC4	SDC5
目標性能 (P_f)	1×10^{-4}	4×10^{-5}	1×10^{-5}
AR	0.4	0.8	0.8
超過確率 H_D	4×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-4}

*SEI (Structural Engineering Institute)

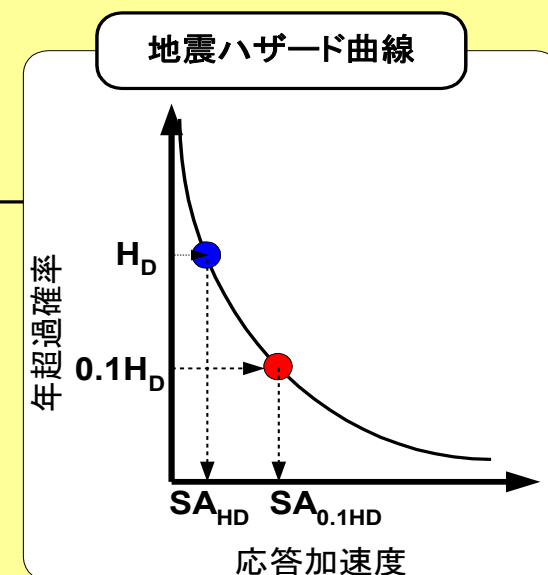
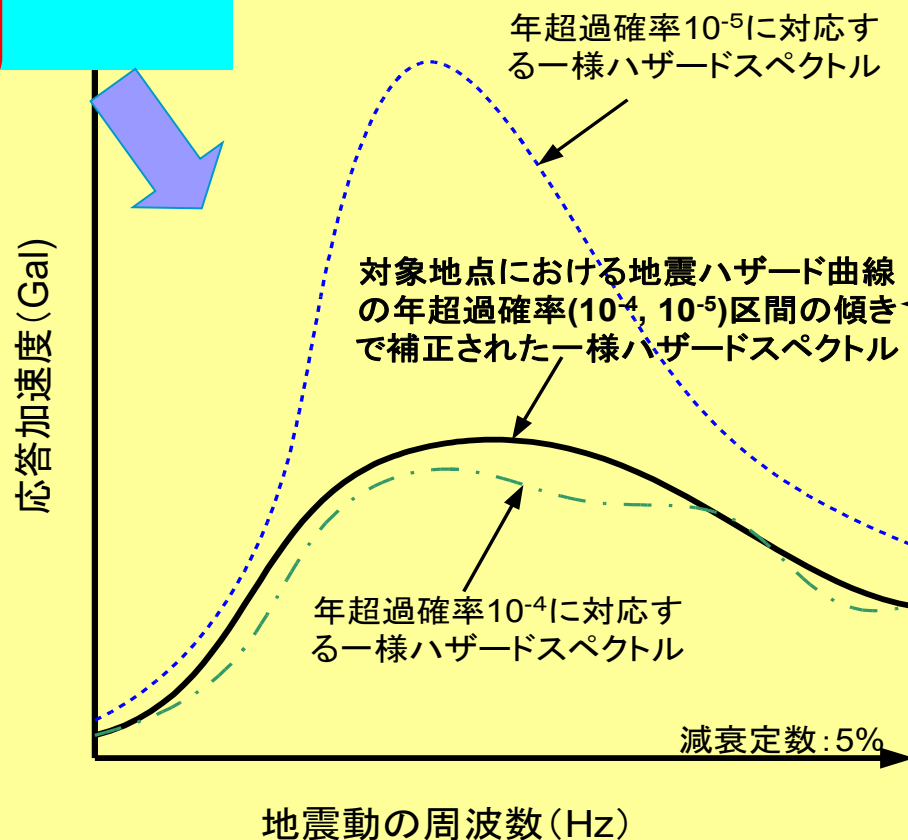
NRCが提案するリスク適合地震動GMRS

$$GMRS = UHRS \times DF$$

$$DF = \max \left\{ 1.0, 0.6 (AR)^\alpha \right\}$$

$$AR = \frac{SA_{0.1HD}}{SA_{HD}}$$

一様ハザードスペクトルUHRSを，周期毎に地震ハザード曲線のある区間の情報ARで補正



3. 纏め(本講演でお伝えしたいこと)

纏め

- ◆地震PRAは、原子力発電所システムの地震時の弱点把握および定量的リスクを示す強力かつ有力なツールである。既に多くの国において実施されている／実施予定である。
- ◆現在利用可能な評価手法・データを用いて、現在可能な最高品質のハザード評価を行うことで、リスク評価だけでなく、工学的な目的（施設・構造物の設計、安全性評価、国土・地域の防災等）に利用することが重要であると考えています。
- ◆PRAの考え方は、他の重要施設・構造物のリスク評価にも適用可能と考えています。