

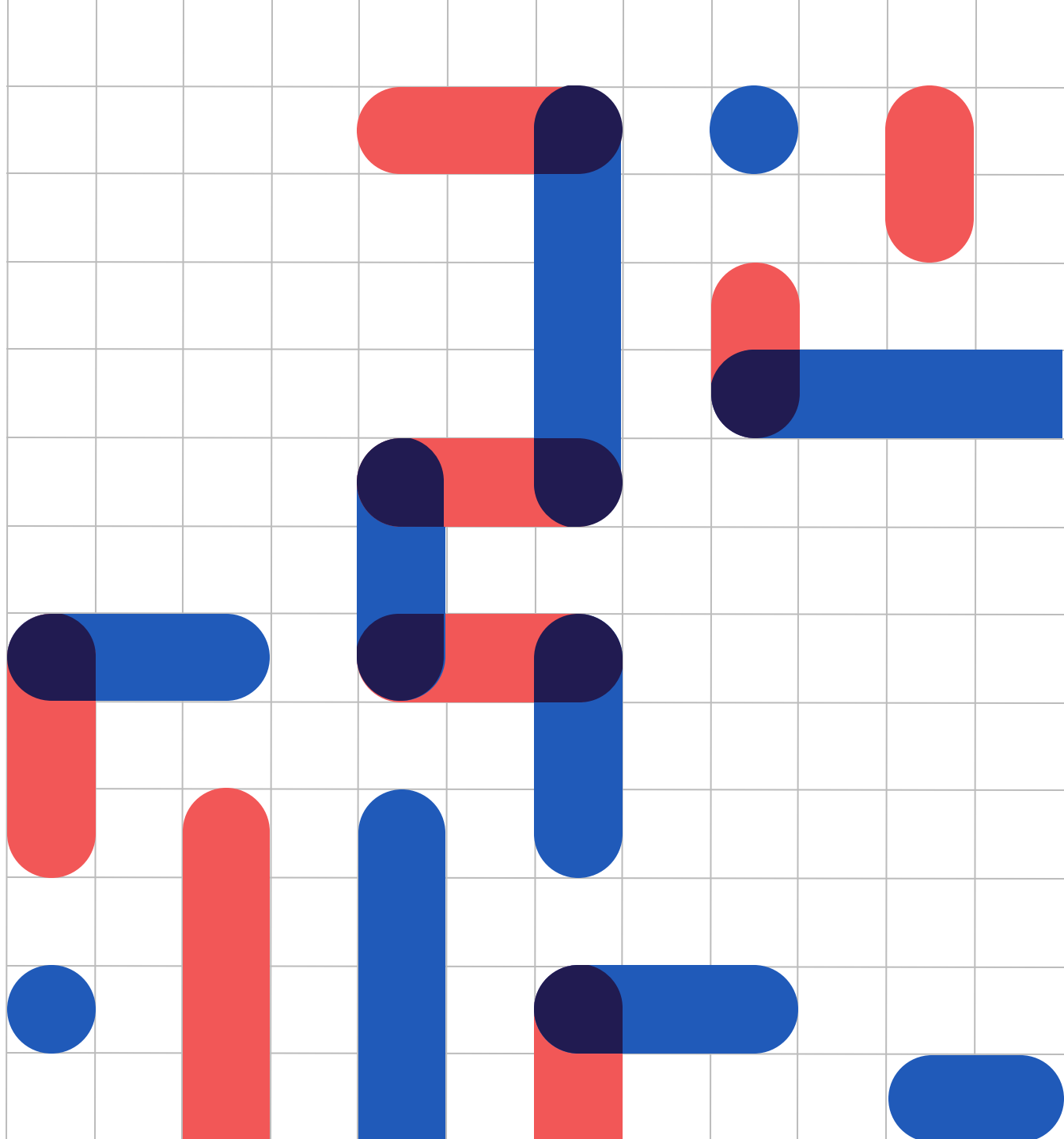
原子力発電所の 地震に対する 安全性とその評価

Seismic safety of
nuclear power plants
and its assessment

糸井達哉

東京大学大学院工学系研究科

itoi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



本日の内容

01

原子力発電所の
耐震安全性

02

リスクとは？

03

地震リスク評価
の枠組み

04

地震ハザード評価
における
不確実さの評価

05

地震リスク評価結果
をどのように
活用するか？

06

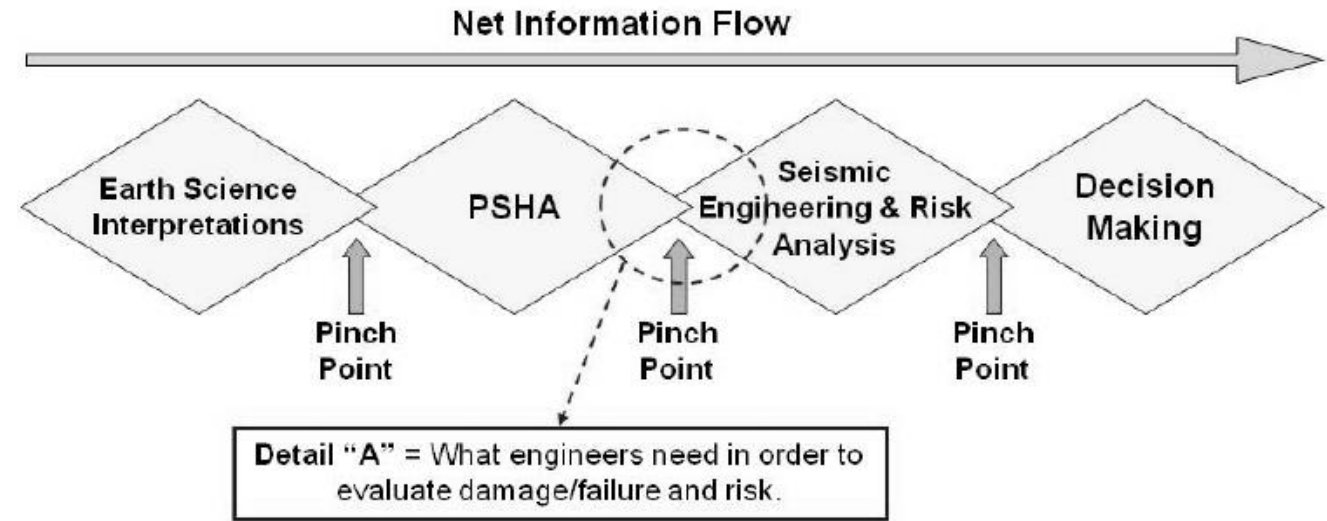
まとめ

01

原子力発電所の 耐震安全性

原子力発電所の耐震安全性評価に必要なことは？

- 原子力発電所の安全性に関する意思決定に資する地球科学、地震動予測、地震工学的な評価には何が必要か？
 - 一般建築・土木構造物の耐震安全性と同じ部分は？同じではない部分は？

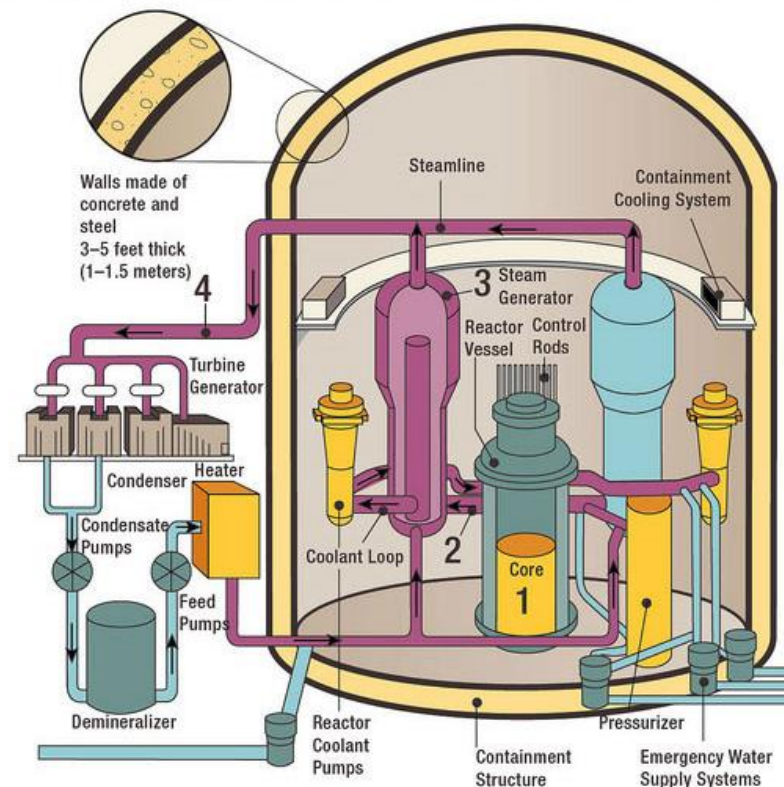


(* Source: Adapted from Allin Cornell's "scribbles" to the author; circa 1984)

【1】 出典：NEA (2009), Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications: Workshop Proceedings, OECD Publishing, Paris
This is an adaptation of an original work by the OECD. The opinions expressed and arguments employed in this adaptation should not be reported as representing the official views of the OECD or of its Member countries.

加圧水型原子炉(PWR)の場合

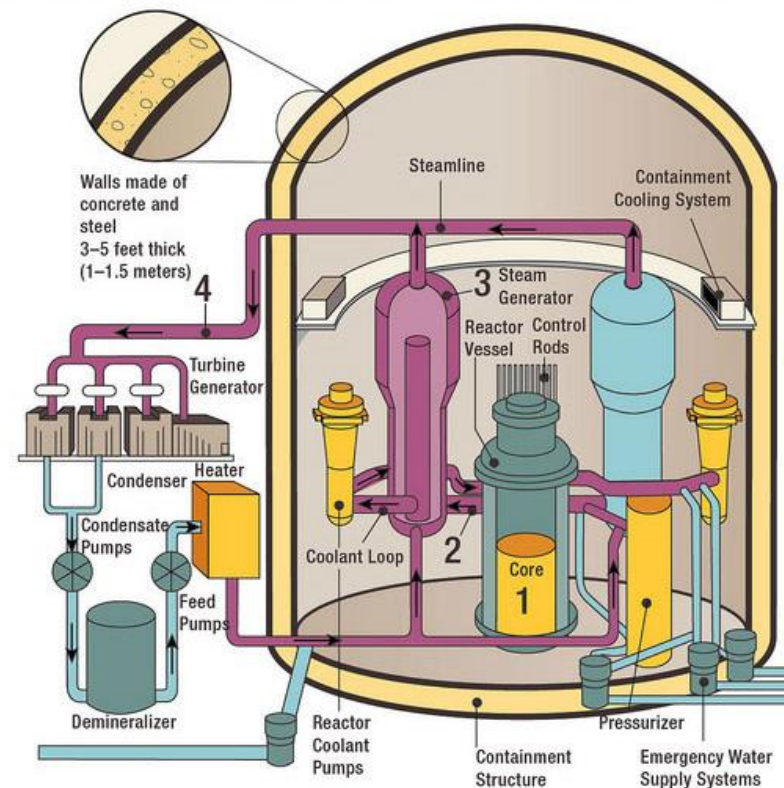
- 原子炉容器内の炉心における核分裂反応で熱が生成
- 一次冷却ループ内の加圧された水が、その熱を蒸気発生器へ運搬（一次冷却水には、圧力[100～160気圧程度]をかけられており沸騰しない）
- 蒸気発生器内では、一次冷却ループからの熱が二次ループ内の水を蒸発させ、蒸気を生成
- 蒸気ラインは蒸気を主タービンに送り、タービン発電機を回転させ発電



【2】 出典："Typical Pressurized-Water Reactor"
(U.S. Nuclear Regulatory Commission Webサイト)

加圧水型原子炉(PWR)の場合

- 未使用の蒸気は復水器で水に凝縮され、再加熱されて蒸気発生器に
- 炉心は、ポンプを使って循環される一次冷却水によって冷却
- ポンプなどの設備を動かすには、外部の電力網からの電力が必要
- 外部からの電源が失われた場合に備え、非常用のディーゼル発電機などを準備



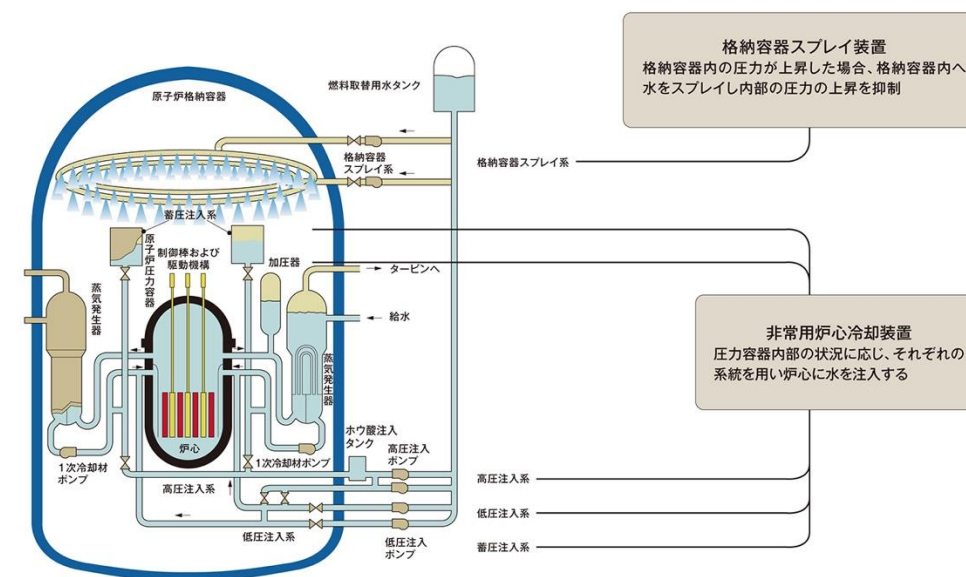
【2】 出典: "Typical Pressurized-Water Reactor"
(U.S. Nuclear Regulatory Commission Webサイト)

止める・冷やす・閉じ込める (controlling the reactor, cooling the fuel and containing radiation)

- 工学的安全施設
 - 一次冷却系設備や二次系などの破損、故障等に起因し、原子炉容器内の燃料が破損する可能性がある場合に、これらを防止・抑制する施設

☞ 以上のような安全上重要な（異常の検知や事故の防止など）機能を地震後に確保することが、地震に対する耐震設計の大きな目的であり、原子力安全規制の要求事項

非常用炉心冷却装置等の例 (PWR)



5-2-3

原子力・エネルギー図面集

【3】 出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」

原子力発電所の立地評価 (地震リスクの観点)

- 立地評価では、原子力発電所の安全性（放射線の有害な影響から人々と環境を保護すること）に影響を及ぼす可能性のある自然ハザードや人為ハザードを特定。地震ハザードの場合、
 - 設計基準地震動を策定するためなどに必要な地震動のハザード評価
 - 原子力施設の安全性に影響を及ぼす可能性のある断層変位の可能性の評価（立地の適合性の評価を含む）
 - 液状化、地すべり、不同沈下などの地盤の被害、津波などの外部洪水現象や火災などの随伴現象のハザードの評価

原子力発電所の立地評価のポイント

- 原子力発電所の運用を成功させるにあたり、初期段階におけるサイトの選定と評価の役割は極めて大きい
 - 初期段階における不十分な検討や決定は、後々の時間、費用などに深刻な影響
- 立地評価は、初期段階に行うだけでなく、運転期間にわたり継続的に行うこと（安全性に対する定期的なレビュー）が重要
 - 定期安全評価は、新しいデータや情報を含めた最新の知見を踏まえて適切に実施されることが必要

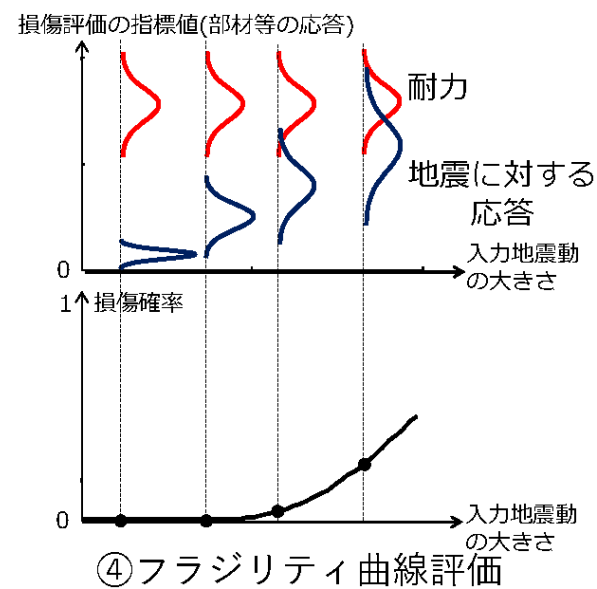
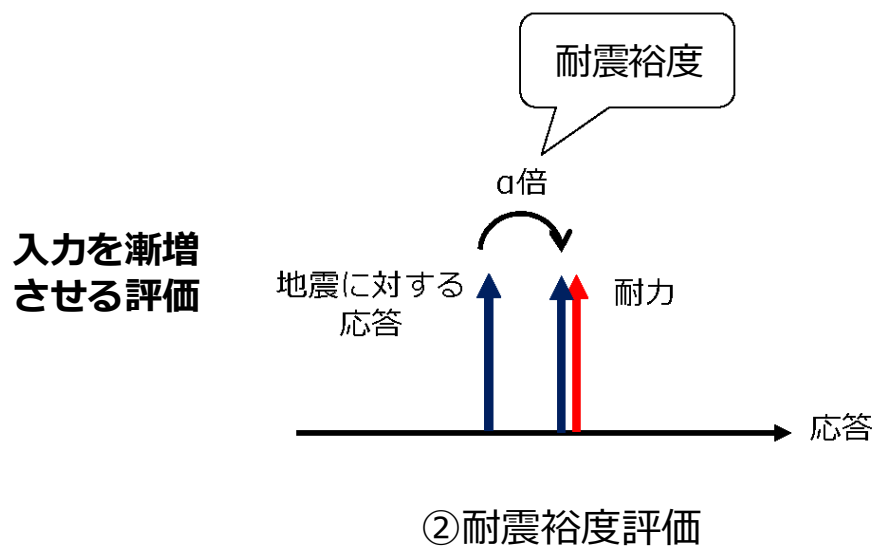
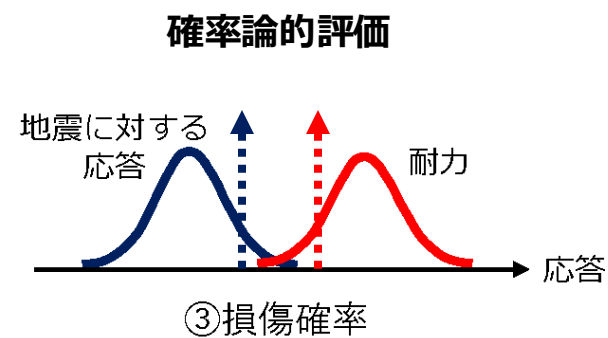
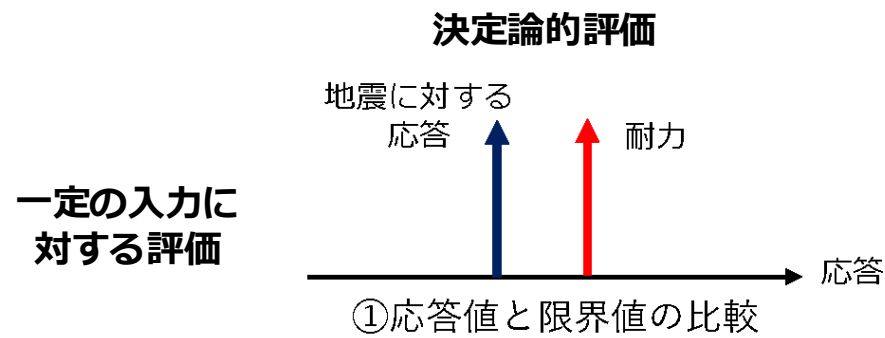
原子力発電所の耐震設計の流れ

- a. 設計基準地震動の策定
 - 歴史地震, 活断層や地質の詳細な調査などを踏まえて策定
- b. 耐震重要度の分類
 - 原子力安全規制の観点からは, 設備・機器, 構造物などを放射性物質の放出等に関わる安全上の重要性などに応じて分類
- c. 耐震設計法 (関連する基規準) の選択
 - 機械, 建築, 土木等分野を横断
- d. プラントレイアウトや機能要求を踏まえた基本設計
 - 過去の経験・教訓を適切に考慮した設備・機器, 構造物などの設計
- e. 地震応答の評価
 - 地盤による地震動の増幅, 地盤建屋相互作用, 建屋などの構造物の地震応答, 荷重組み合わせ (異常時や事故時の地震発生 の考慮など)
- f. 設備や構造部材の仕様の決定と適切性の確認
 - 解析や試験による
- g. 余裕度 (耐震余裕度) の評価
 - 十分な余裕があることを定量的に確認

(設計)基準地震動の策定 (Design basis ground motion)

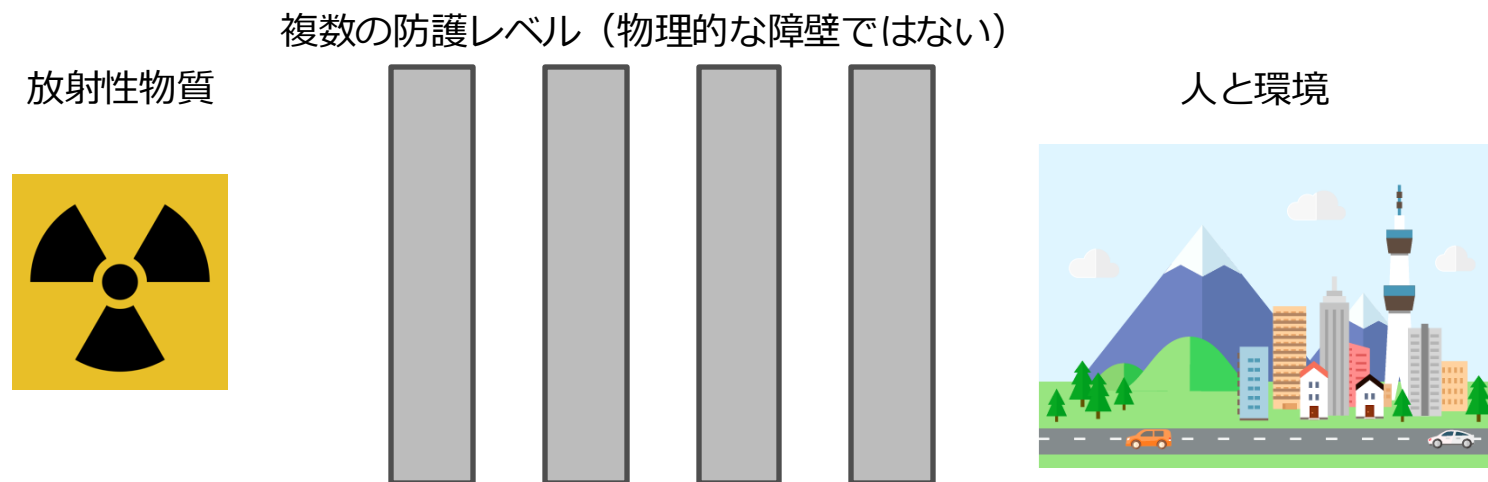
- 確率論的評価
 - 確率論的ハザード評価の結果を用いて設計基準地震動（米国等ではsafe shutdown earthquakeと呼ぶ）を策定する場合、年超過確率値が 10^{-3} to 10^{-5} （平均ハザード曲線での値）程度の揺れ（IAEA SSG-67）
 - ☞ 参考：米国では一般建築物について、倒壊確率50年1%程度（設計用地震動の年超過確率を 4×10^{-4} 程度）が目標
- 決定論的評価（シナリオ地震による評価）
 - 考慮するシナリオ地震について多くのデータが入手可能な場合に実施可能
 - 確率論的評価も併せて実施し結果を比較することで、リスク的な観点での洞察を得ることができる

耐震設計における不確実性の取扱い(模式図)



深層防護 (Defense in Depth)

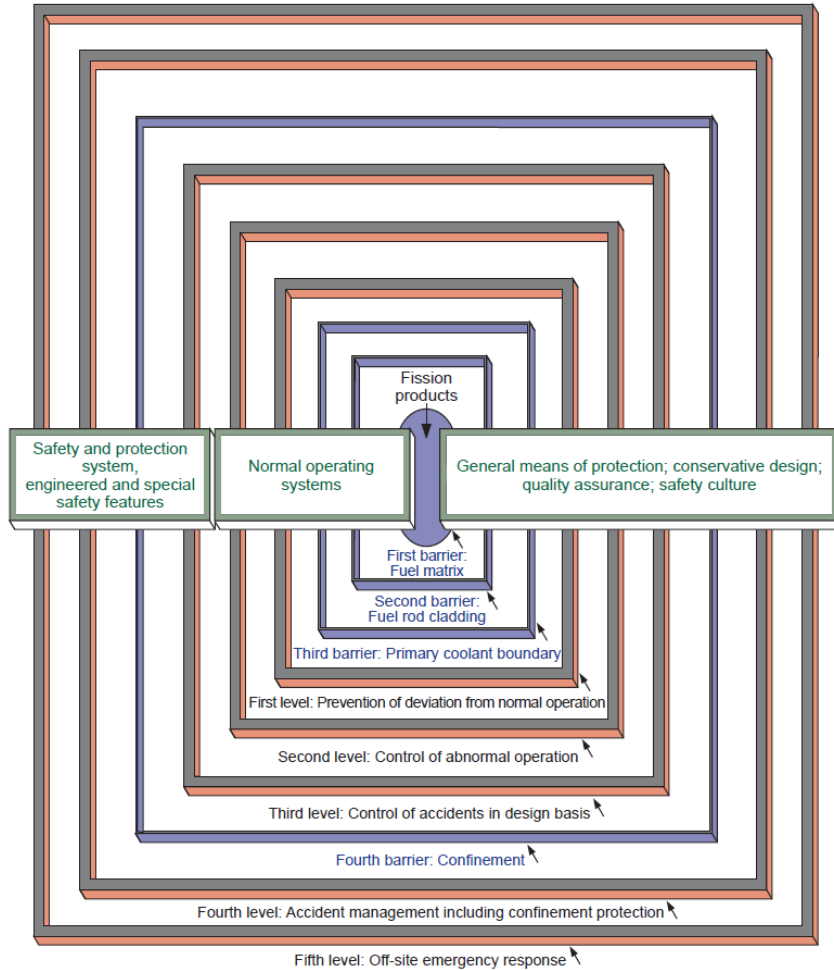
- 放射性物質の放出を伴う事故の発生防止, 発生時の影響緩和に関する考え方
- 複数の (可能な限り) 独立した冗長な形で, 防護の目的を段階的に設定し, それぞれの目的を実現する方法を用意することで, ハードウェアの故障・損傷に伴う機能喪失や人的過誤が発生したとしても, 人や環境に影響がないことを目指す
 - 単一の防護に依存することは, それがどれほど堅固であったとしても適切ではないという前提



深層防護 (Defense in Depth) (続)

- 各々の防護レベルの目的と手段
 1. 異常の発生を防止するための保守的な設計や高品質な建設
 2. 異常を検知するための様々な仕組みや設備
 3. 事故を想定内に収めるための冗長かつ多様な安全系
 4. 過酷な事故状態を制御するための緊急時の対応の準備（我が国では、福島第一原子力発電所事故後に規制対象に）
 5. 放射性物質の影響を緩和するための発電所敷地外における対応の準備（自然災害と原子力災害の同時発生をどのように考えるかが福島第一原子力発電所事故後の議論に）

深層防護 (Defense in Depth) (続)



地震に対して深層防護を有効にするために重要な観点

- 共通原因損傷 (common cause failure) : 地震の揺れは様々な設備・機器・構造物などに同時に作用するため、多くの設備・機器・構造物が同時に損傷する可能性 (敷地内外の空間的な被害の広がり)

FIG. 4. The relation between physical barriers and levels of protection in defence in depth.

【4】 出典 : INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG Series No. 12, IAEA, Vienna (1999)

02

リスクとは？

安全 (safety)とは？

例えば, ISO/IEC Guide 51では

- 許容できないリスクから解放された状態 (freedom from risk which is not tolerable)
- 安全かどうかは, 客観的視点だけで決まるものではなく, 社会的視点 (社会状況や価値観) も含めて総合的に判断されるもの
- 安全は, 経験の評価や研究を通じて学び進化するもの
 - 定期的な安全性の再評価
 - 安全を実現するには, 技術的要因だけでなく, 人的要因や組織的要因とそれらの相互作用を考慮することが重要

リスクの定義 (米国原子力規制委員会による定義)

リスクトリプレット (risk triplet) : 3つの質問

- どのような悪いことが起きうるか？ (What can go wrong?)
- それはどの程度起こりやすいか？ (How likely is it?)
- どのような結果になるのか？ (What are the consequences?)

不確実性 (uncertainty)

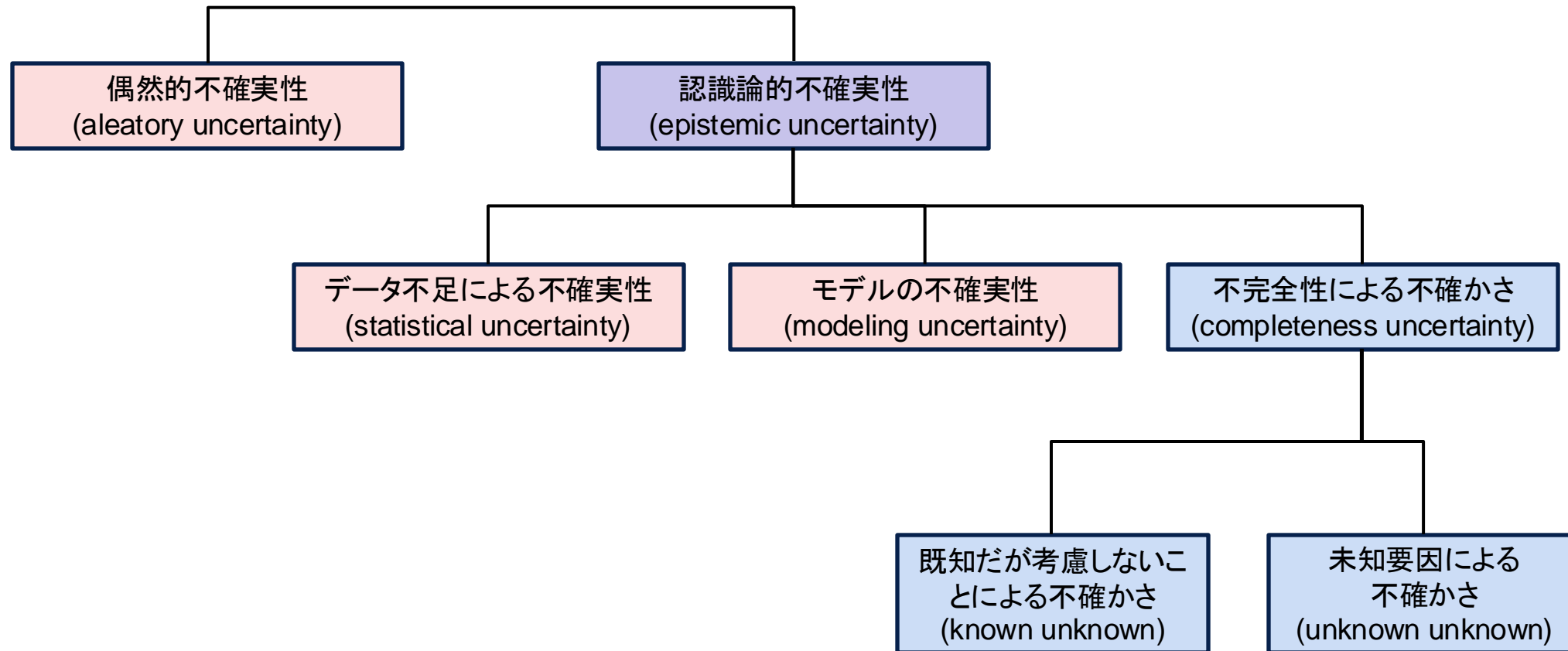
リスクは不確実性と深く関係。不確実性は大きく2つに区分。

- 偶然的不確実性 (Aleatory uncertainty)
- 認識論的不確実性 (Epistemic uncertainty)

「偶然的不確実性」は、異常な事象や構造物の損傷といった事象の偶発性に関係。確率論的リスク評価 (PRA) などの確率論的手法は、一義的には、偶然的不確実性をモデル化したもの。

「認識論的不確実性」は、確率論的リスク評価 (PRA) などの評価モデルにおいて、プラント損傷や挙動をどのように表現するかに関する認識の不完全性から生じる。たとえば専門家間の意見の違いといった形で顕在化

不確実性 (uncertainty)



【6】 牟田仁 & 糸井達哉. (2020). よくわかる PRA~ うまくリスクを使えるために~ 第 2 回 リスクと不確かさ. 日本原子力学会誌 ATOMOS, 62(7), 385-388., p. 386, 図1を元に作成

リスク論の重要性

- 正しい判断を行うためには、将来生じるであろう可能性をなるべく多く知っておいた方が良い
 - データが十分でなく客観的な判断が難しいものについても同様
- 安全性向上の王道：失敗に学ぶという方法
 - ただし、再発防止にとどまる
 - 原子力発電所などの工学システムは、発生する事故の規模は大きくなる傾向にあり、何度も事故を経験することが許されるという状況ではない
- したがって、工学システムの事故は、経験しない事故をその可能性を考慮して経験する前に防ぐことが重要

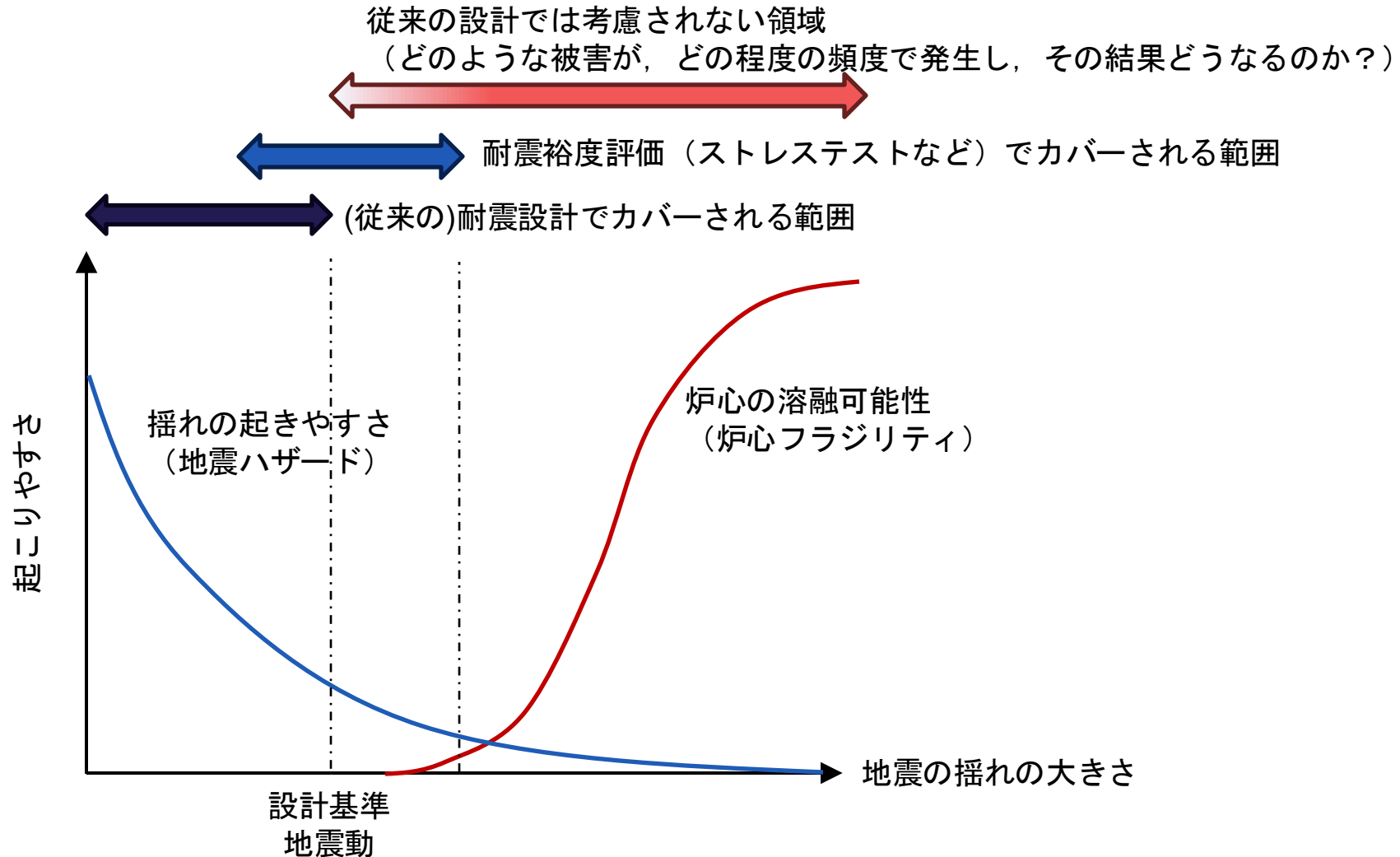
Risk-basedからRisk-informedへ

- Risk-basedの意思決定は
 - （従来の様々な考慮事項と同様の知見がリスク評価から得られるという前提で）リスク評価から得られる洞察のみから物ごとを決めようというアプローチ
- Risk-informedの意思決定は
 - （リスク評価は万能ではない部分もあるという前提で）重要な問題については、リスク評価から得られる洞察を、古典的な方法に加えて考慮し、物ごとを決めようというアプローチ

03

地震リスク評価の 枠組み

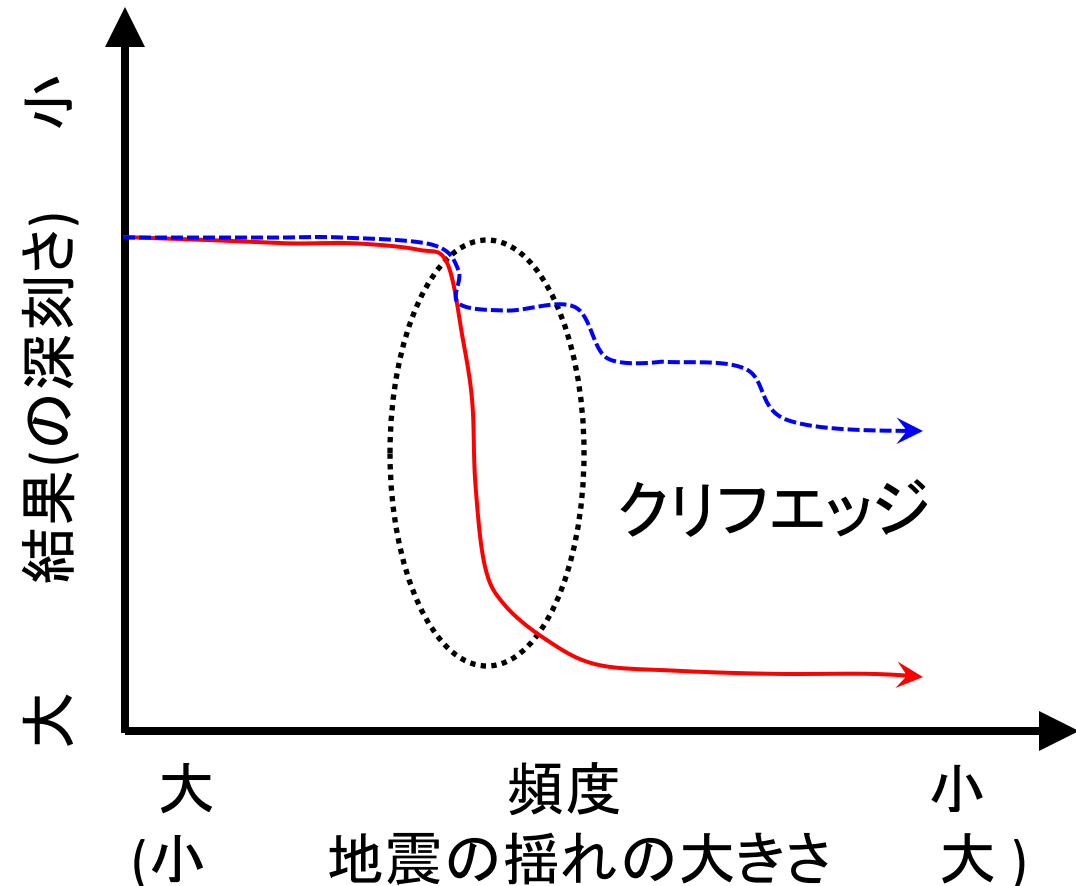
地震に対する原子力発電所のリスク評価の スコープ (レベル1PRAの場合)



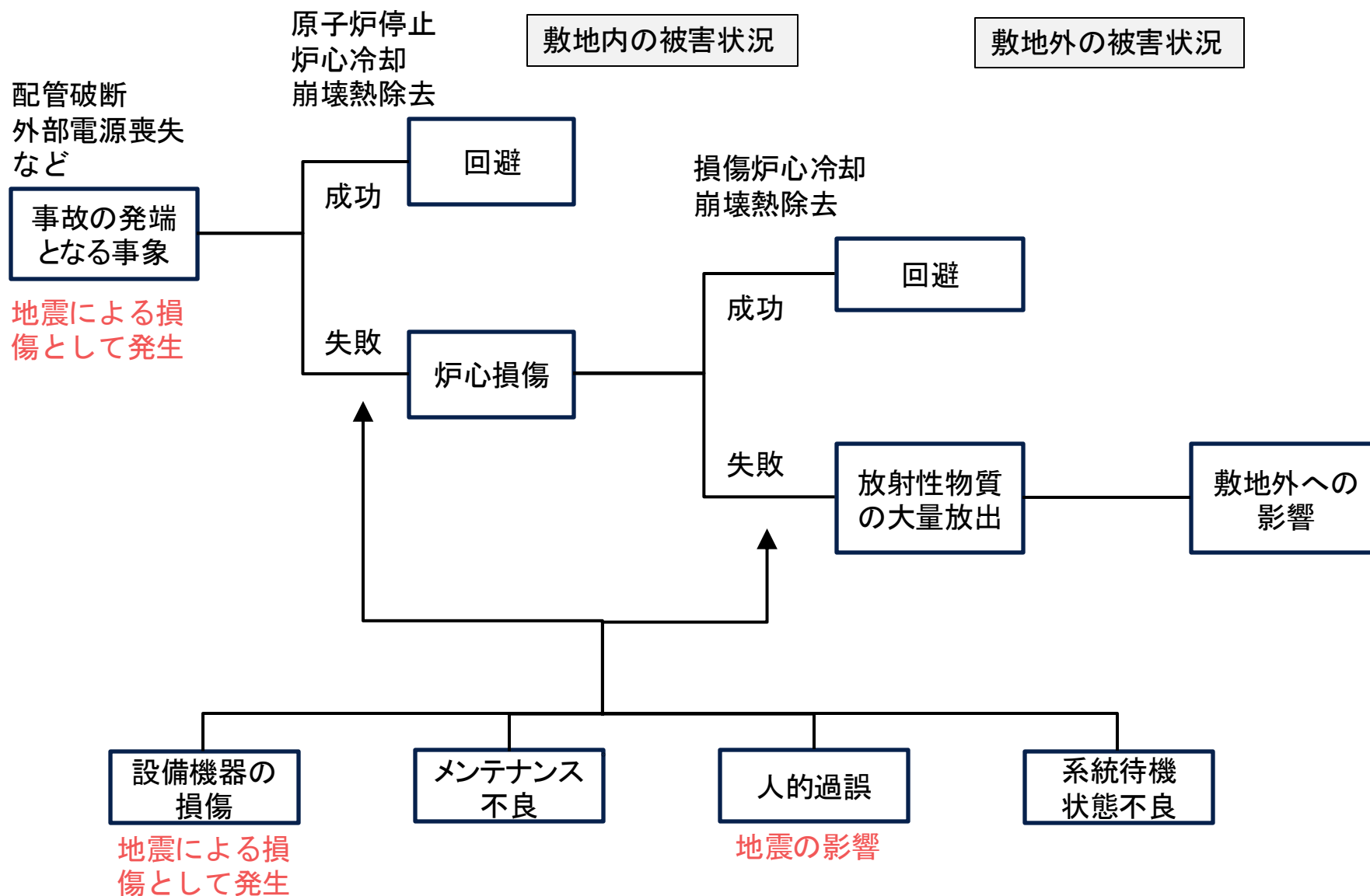
クリフエッジ効果 (Cliff edge effect)

パラメータの小さなずれや入力値のわずかな変動に伴い、原子力発電所がある状態から別の状態へ急激に移行することで、深刻な異常状態が引き起こされること (IAEA Nuclear Safety and Security Glossary 2022 edition)

原子力発電所では、十分な余裕を確保するなど、クリフエッジの発生を抑制することが必要

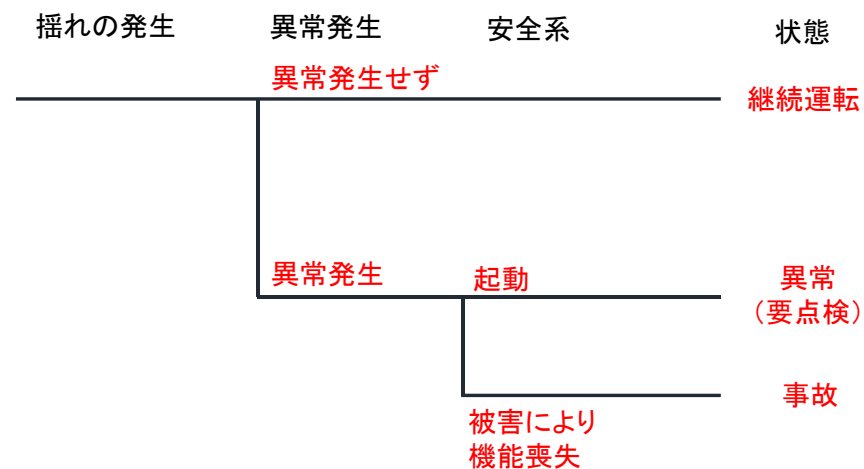


原子力発電所の事故進展の全体像



事故シーケンス評価

揺れにより設備・機器や安全系に損傷が発生するか，損傷が発生した場合に安全系は機能するかどうかなどを加味し，事故にいたるシーケンスとその頻度を求める

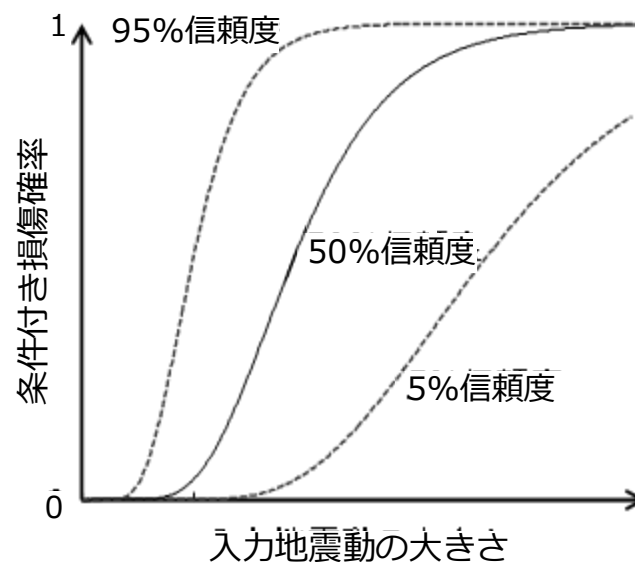
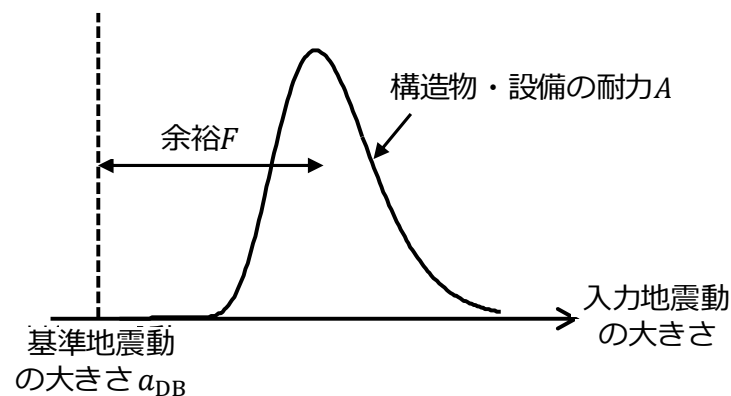


定性的なイベントツリーのイメージ図

【8】出典：日本原子力学会，『リスク評価の理解のために：2020 (AESJ-SC-TR011: 2020) 』

地震フラジリティ評価 (SFA)

- 事故シーケンス上重要な構造物, 設備・機器等について評価を実施
- 耐震設計を行った建屋・機器・配管等の耐力 A を入力地震動の強さで表したものの
- 基準地震動の大きさ a_{DB} に対する余裕 (裕度) F
- 地震に対する構造物の「応答」と「強度」の両面から評価



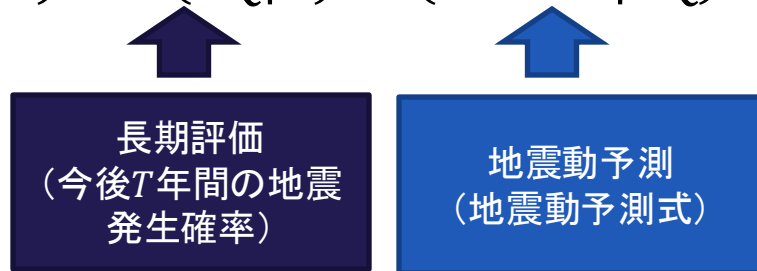
上【9】下【10】 出典：日本原子力学会，『リスク評価の理解のために：2020 (AESJ-SC-TR011: 2020)』より引用

確率論的地震ハザード評価 (PSHA)

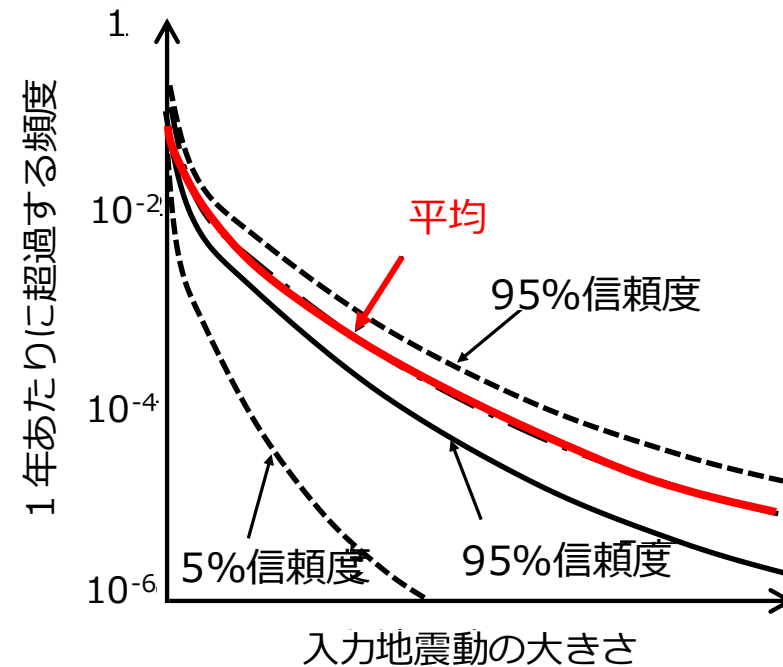
「地震の揺れの強さ」と「ある期間内にその強さを超える揺れが発生する確率(頻度)」との関係

地震動強さ IM が x を超える揺れが、今後 T 年間で発生する確率: $P(IM > x|T)$

$$P(IM > x|T) = P(EQ|T) \cdot P(IM > x|EQ)$$



“地震ハザード評価” は “地震発生の評価” とは異なる



【11】 出典：日本原子力学会，『リスク評価の理解のために：2020 (AESJ-SC-TR011: 2020)』

04

地震ハザード評価に おける不確実さの評価

地震ハザード評価とは

今後 T 年間に、地震動強さ IM が x を超える揺れが発生する確率
 $P(IM > x|T)$ は

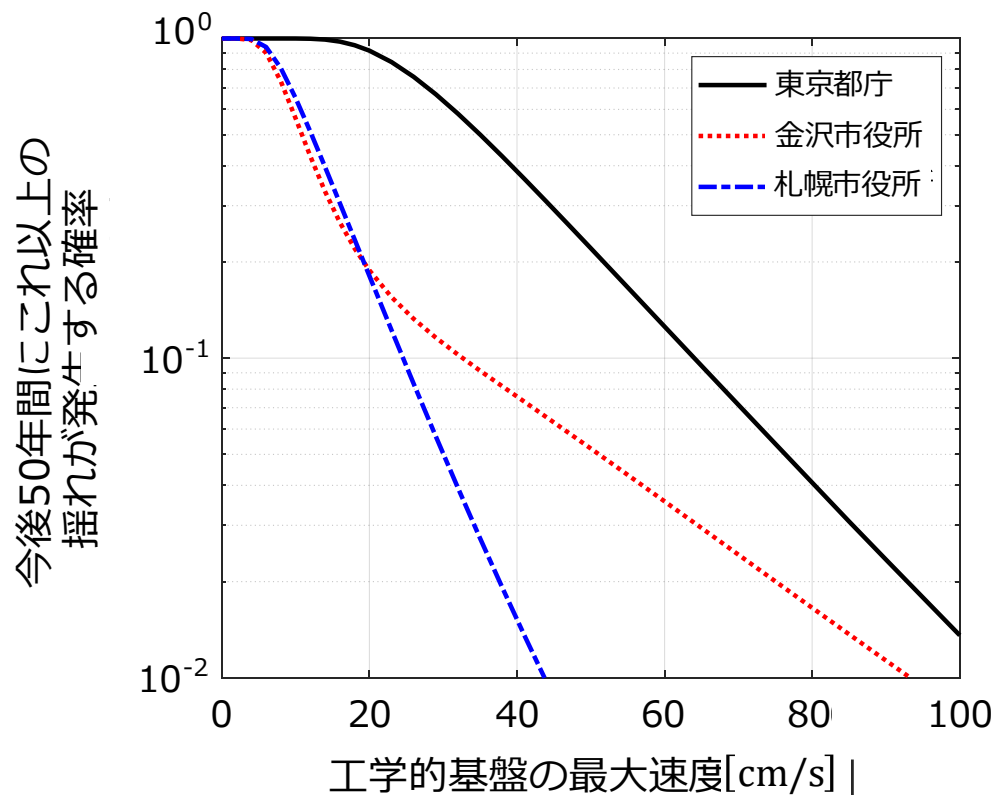
$$P(IM > x|T) = P(EQ|T) \cdot P(IM > x|EQ)$$

今後 T 年間で地震が発生
する確率
(長期評価)

地震が発生したとき、その揺れ
(地震動強さ IM)が
 x を超える確率
(地震動予測)

地震ハザード評価から得られる結果 (地震ハザード曲線)

- 揺れの大きさとその起こりやすさの関係
- 計算過程にさかのぼると次のようなこともわかる
 - 東京では、フィリピン海プレートや太平洋プレート間／内で発生する中小規模の地震の影響が大。また、南海トラフ地震の影響も長周期構造物では要考慮
 - 金沢では、森本・富樫断層帯の影響が支配的
 - 札幌では、直下地震や日本海溝の巨大地震の影響が大



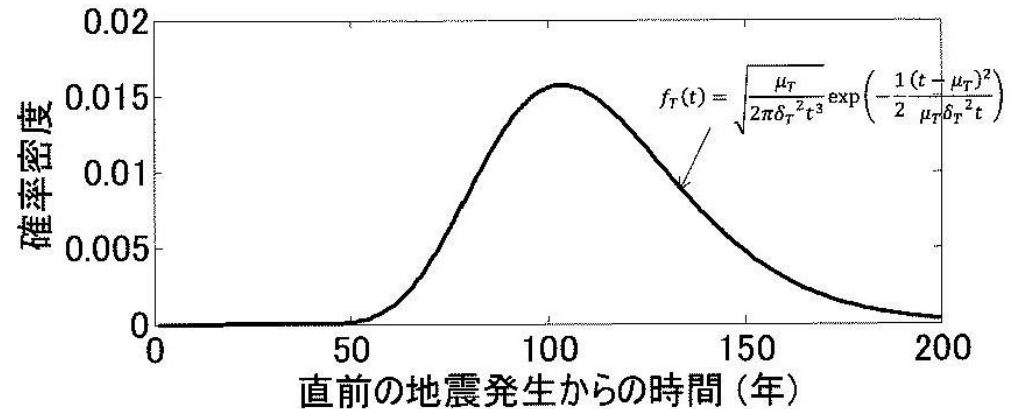
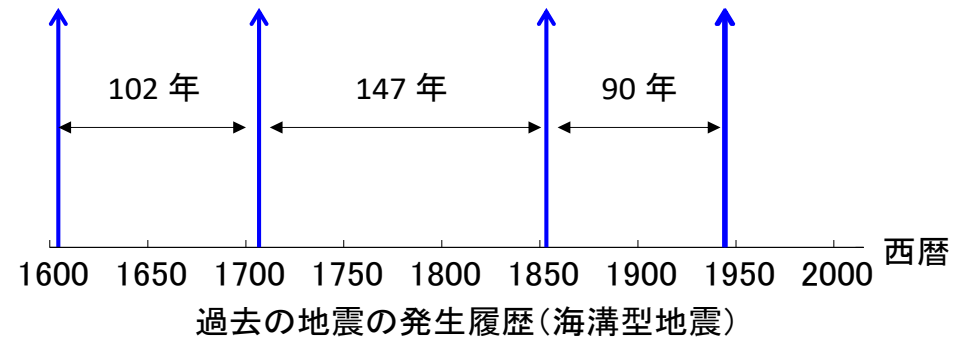
【12】 J-SHIS (<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>) よりダウンロードした地震動予測地図データを用いて作図

長期評価

- プレート境界の地震については過去1000年程度，主要活断層の地震については過去10万年程度の履歴に基づき将来活動しうる地震を網羅的に抽出
- それらの地震の規模（マグニチュード）と今後再び発生する確率を評価
- プレート運動による定常的な応力蓄積過程において，ブラウン運動として表現される応力場の擾乱が加わる中で，応力蓄積が一定値に達し地震が発生するという物理的過程を踏まえたモデル（BPT分布）

$$f_T(t) = \sqrt{\frac{\mu_T}{2\pi\alpha^2 t^3}} e^{-\frac{(t-\mu_T)^2}{2\mu_T\alpha^2 t}}$$

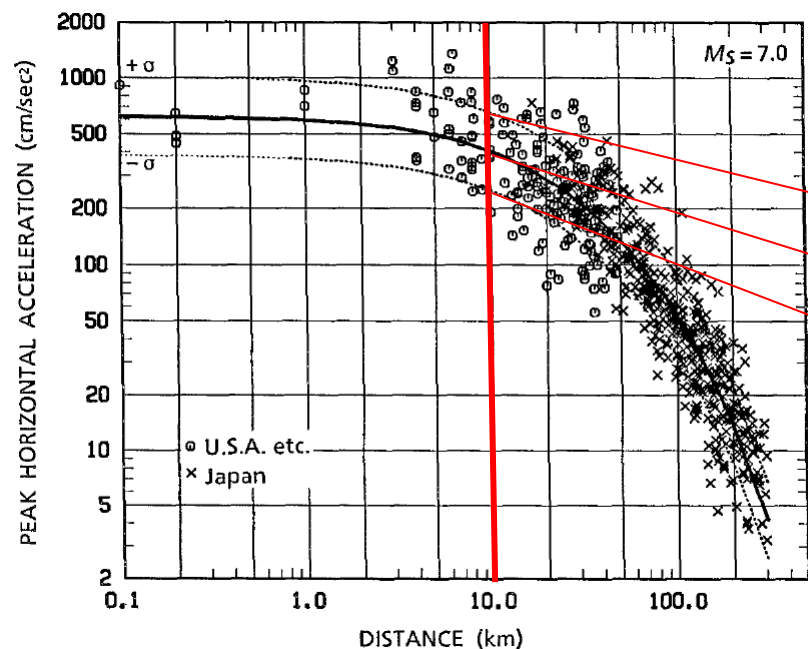
- 現在が直前の地震から何年か？ 今後何年の地震発生を評価するか？を決めると地震発生確率が評価できる



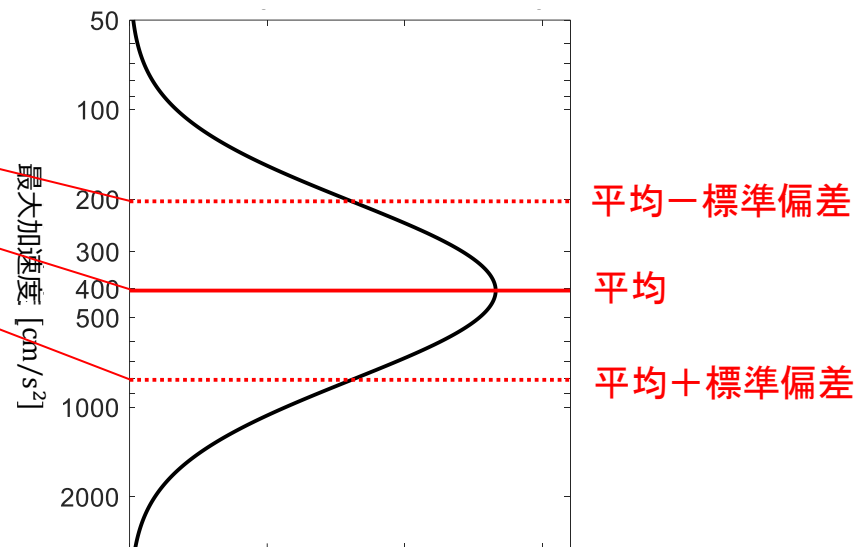
上【13】下【14】 出典：日本原子力学会，『リスク評価の理解のために：2020（AESJ-SC-TR011：2020）』より引用

地震動予測

- 観測地震動記録から
 - 震源特性（マグニチュードなど）
 - 伝播経路特性（断層からの距離など）
 - 地盤増幅特性を説明変数に回帰し求めた統計式
- 地盤増幅特性については、評価地点における観測記録で補正を行うことが望ましい（サイト固有の地震動評価）



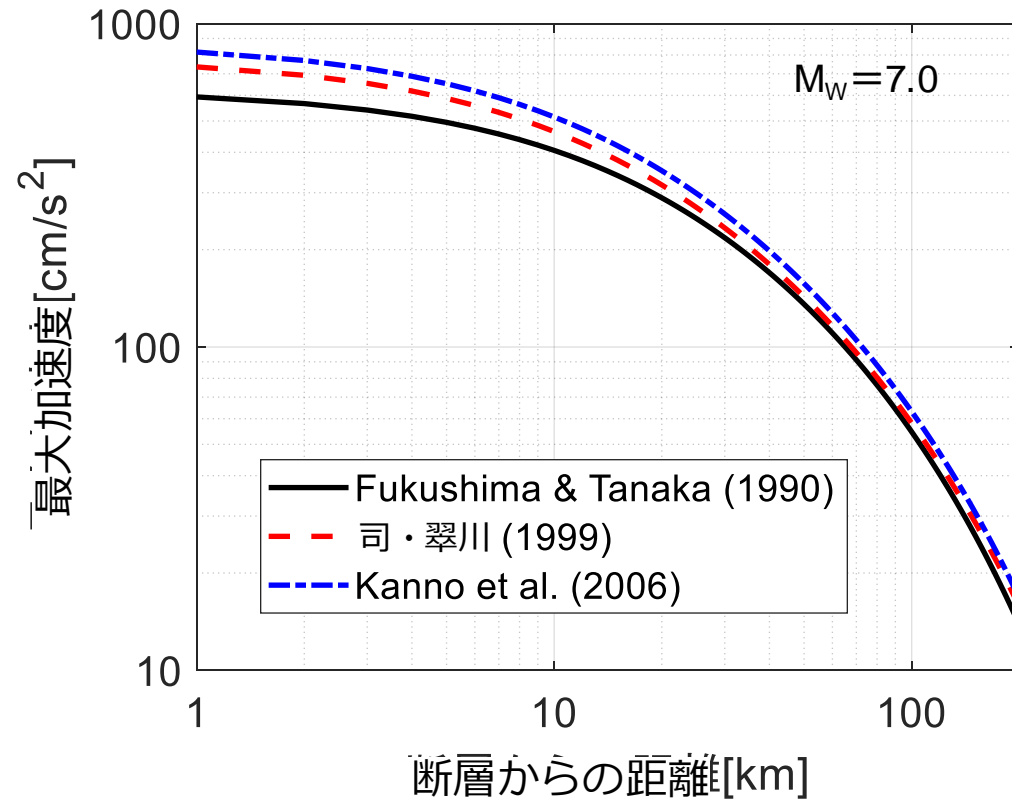
例えば、マグニチュード7.0で、断層からの距離が10kmのとき、



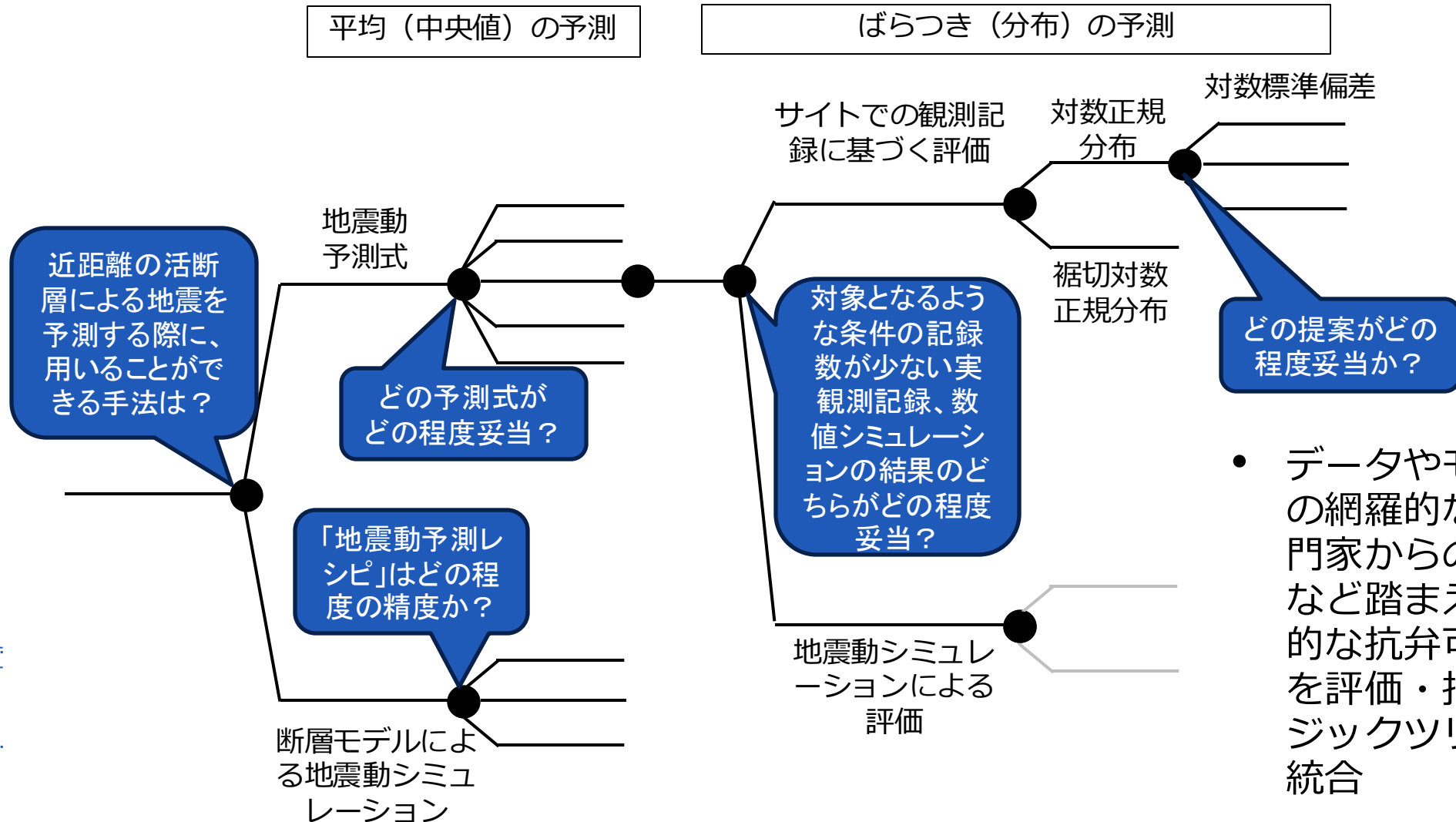
【15】 Used with permission of Seismological Society of America, from A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Yoshimitsu Fukushima & Teiji Tanaka, Bulletin of the Seismological Society of America (1990) 80 (4): 757-783; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

地震ハザード評価における認識論的不確実さの評価の重要性 (地震動予測式の例)

- 次の要因で、特に観測記録の量が十分でない（マグニチュードが大きく断層からの距離が短い）領域で、式ごとに異なる予測
 - 回帰に用いる地震動記録の違い
 - モデル（式の仮定など）の違い



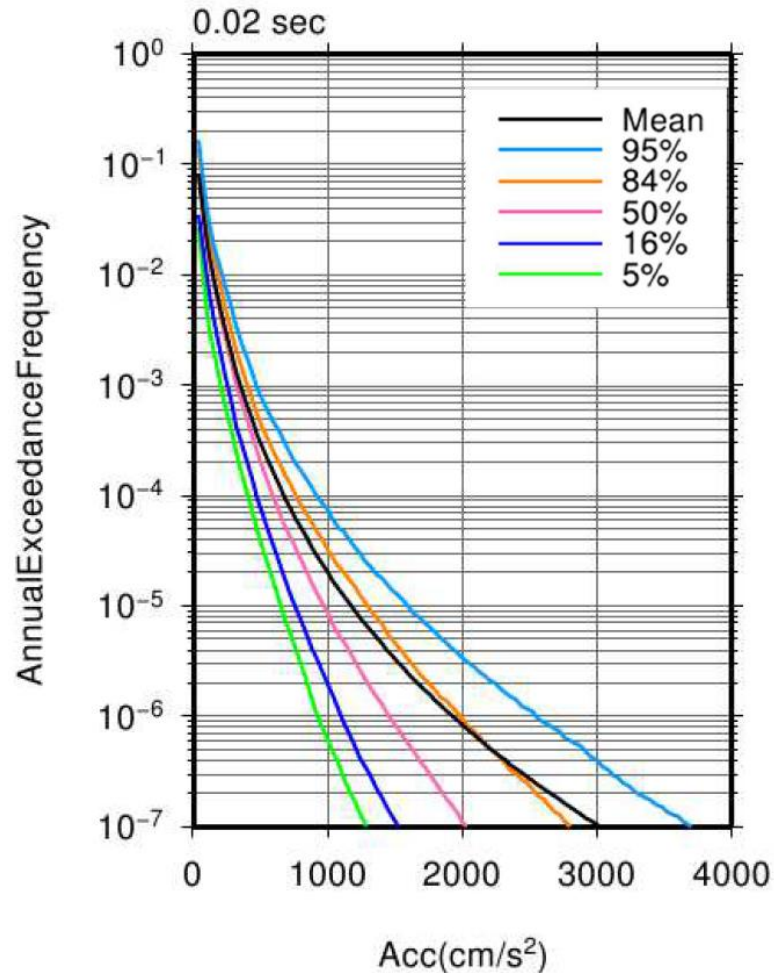
ロジックツリーによる認識論的不確実性の評価例（地震動予測の場合）



- データやモデルなどの網羅的な収集、専門家からの意見収集など踏まえて、技術的な抗弁可能な手法を評価・抽出し、ロジックツリーの形で統合

認識論的不確実性を考慮した地震ハザード曲線の例（伊方発電所）

- 信頼区間が認識論的不確実性の大きさに相当
- 代表として、平均ハザード（右図のmean）を用いることも多い

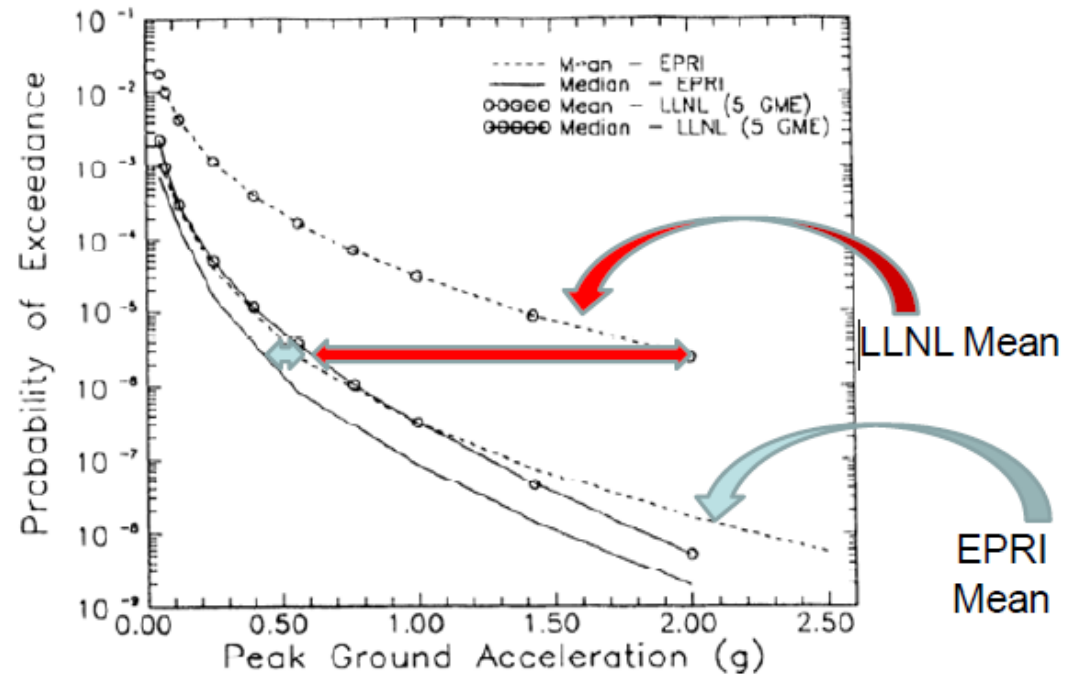


フラクタルハザード曲線（全震源，水平動）

【16】 出典：松崎伸一（四国電力）「地震動評価の高度化に関する最近の取り組み～伊方SSHACプロジェクト～」，日本原子力学会 原子力安全部会 第8回「原子力安全夏期セミナー」（2024年9月2-3日）資料

地震ハザード評価における認識論的不確実さの評価の重要性

- 1980年代後半：米国EPRIとLLNLが同一原子力発電所の評価を実施
- 両者（特に認識論的不確実さ）に大きな乖離
- 差異の原因は検討手順にあると結論し、参加者の役割と責任を含めた手順を策定（SSHACガイド）
- 我が国では、伊方発電所でSSHACガイドに基づく地震ハザード評価が2016~2020年に実施され、報告書が公開



Very different results, in terms of mean hazard and associated uncertainty, from the two studies for a single NPP site

05

地震リスク評価結果をど
のように活用するか？

地震リスク評価を実施・活用する意義

- 設計が適切かどうかについて体系的に分析
- バランスの取れた設計が達成されたかを検討
- クリフエッジ効果を回避できているかを検討
- 地震による事故の発生可能性について、立地地点固有の評価を提供
- 設計改善や運用手順の変更などにつながるプラントの脆弱性を同定
- 緊急時手順の適切性の評価
- アクシデントマネジメントに関する洞察を提供

06

まとめ

まとめに代えて

- 原子力発電所を含む工学施設の地震に対する安全確保の基本は、地震学、地震工学、各種工学（建築・土木・機械・電気工学）など個別分野がその基盤
- リスク評価などを用いて、各分野に横ぐしを通すことで、
 - 安全に関わる意思決定がより合理的に
 - 個別分野において必要な評価の要件が明確に
- 上述のような横ぐしを通すような適切な枠組みや体制が整備され、そこに積極的に関わる人が揃うことで、はじめて安全が実現

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	+	NEA (2009), Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications: Workshop Proceedings, OECD Publishing, Paris
【2】	+	"Typical Pressurized-Water Reactor" (U.S. Nuclear Regulatory Commission Webサイト) https://www.nrc.gov/reactors/power/pwrs.html
【3】	+	日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」
【4】	+	INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG Series No. 12, IAEA, Vienna (1999)
【5】	+	Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. Risk analysis, 1(1), 11-27.
【6】	+	牟田仁, & 糸井達哉. (2020). よくわかる PRA~ うまくリスクを使えるために~ 第2回 リスクと不確かさ. 日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 62(7), 385-388., P386, 図1を元に作成
【7】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020)』を元に作図
【8】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020)』
【9】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020)』
【10】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020)』

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020) 』
【12】	+	J-SHIS (https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/) よりダウンロードした地震動予測地図データを用いて作図
【13】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020) 』
【14】	+	日本原子力学会, 『リスク評価の理解のために: 2020 (AESJ-SC-TR011: 2020) 』
【15】	+	Used with permission of Seismological Society of America, from A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Yoshimitsu Fukushima & Teiji Tanaka, Bulletin of the Seismological Society of America (1990) 80 (4): 757-783; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.
【16】	+	松崎伸一 (四国電力) 「地震動評価の高度化に関する最近の取り組み～伊方SSHACプロジェクト～」日本原子力学会 原子力安全部会 第8回「原子力安全夏期セミナー」 (2024年9月2-3日) 資料 http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/seminar2024/summer/08_summer24_Matsuzaki.pdf
【17】	+	酒井 俊朗「確率論的地震動ハザード評価の高度化に関する調査・分析 -米国SSHACガイドラインの適用に向けて-」, 電力中央研究所報告, O15008, 2016年7月, p. 6