

(1) 地震動評価に係る論点

糸井達哉 (東京大学)

はじめに

- 中部電力・浜岡原子力発電所における基準地震動策定に係る不適切事案は、次の点に社会的関心
 - 不正の背景にある**意思決定過程**や**業務プロセス**
 - **安全審査プロセス**の透明性および信頼性
- **不適切事案の再発防止**という観点
 - 規制要求や審査ガイドをさらに詳細化
 - 違反に対する措置を厳格化するという対応
- **高度な専門判断**を要する地震動評価において、**あらゆる判断を規則化することには限界**
 - 過度に詳細な規制は、事業者が規制当局からの個別指摘に受動的に対応する「**宿題型**」の**規制運用**を助長
 - 自主的・継続的な安全性向上を重視する**規制の理念からの乖離**の恐れ

本発表の概要

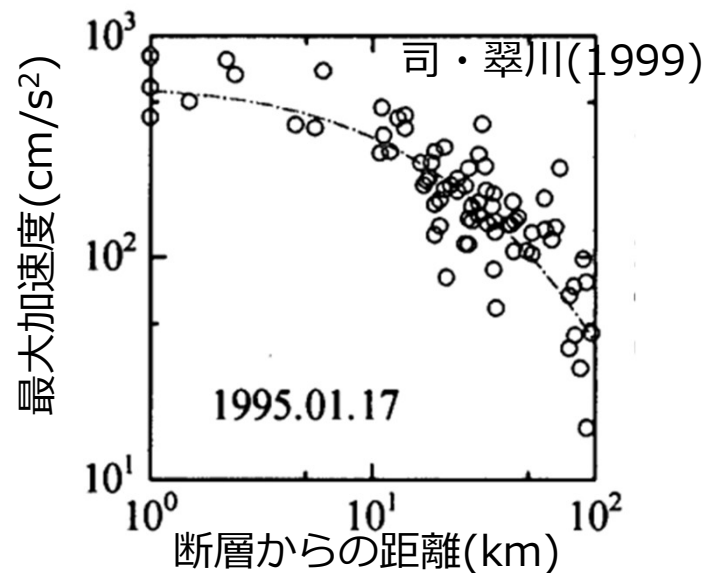
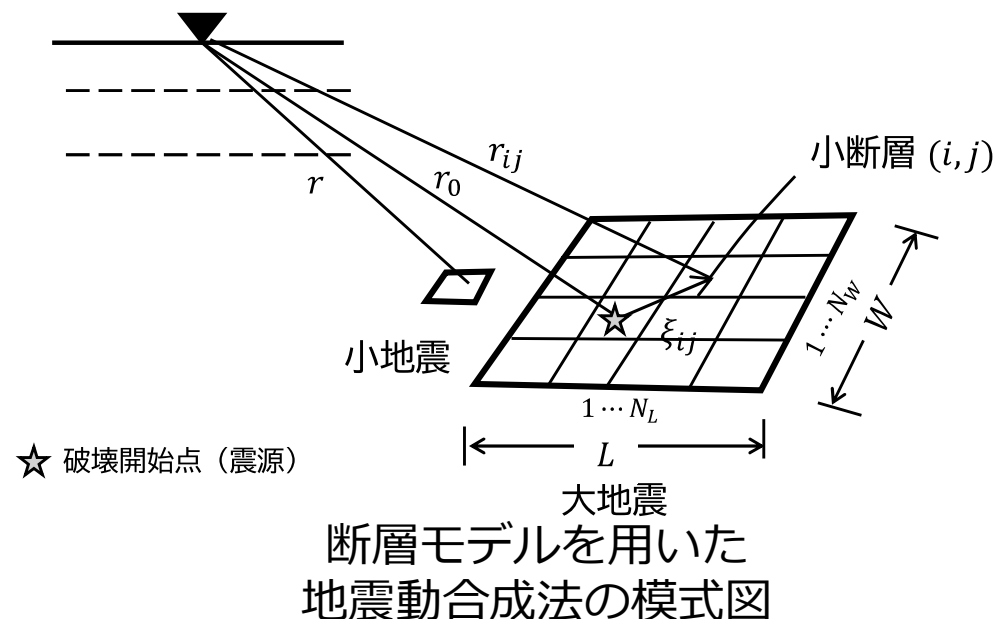
- 個別事業者の問題にとどめず，より広い**制度的・構造的課題の観点**から位置づけて議論する試み[1]
 - **品質マネジメント**の観点に焦点を当て，制度的観点から分析
- この議論を出発点とし，今後のあるべき方向性についての論点を提示
 - **断層モデルの導入**を含めた2006年耐震設計審査指針改訂（2006年指針）**の意義**の振り返り
 - **断層モデル**を用いた地震動評価手法**の概要**
 - その後の関連技術の進展と規制制度の変遷
 - 基準地震動を策定するという**高度な専門判断に関わる課題**について議論

2006年耐震指針改訂の概要

- 1978年：耐震設計審査指針
 - 耐震設計の考え方が、統一的かつ体系的に整理
- 2001年：耐震設計審査指針が改訂
- 2006年：全面的指針改訂
 - 1995年兵庫県南部地震や2000年鳥取県西部地震などの知見
- 2006年指針の特徴
 - 基準地震動を超える地震動に対する「**残余のリスク**」
 - 詳細な活断層調査に基づく基準地震動（**断層モデル**による地震動評価手法）
 - 斜面崩壊・津波など**地震随伴事象**の考慮が明文化 など
- 「残余のリスク」の導入
 - **基準地震動を超える地震動が発生する可能性**
 - 設計基準への適合だけでは安全を語れないという認識
 - その後のリスク情報を活用した安全確保や継続的な安全性向上にもつながる重要な考え方

基準地震動評価における断層モデルの位置づけ

- 2006年指針で基準地震動策定における断層モデルを用いた手法が明確に位置付け
 - 現行規制基準においても，基準地震動策定の考え方として継承
 - 断層モデルを用いた地震動合成
 - 想定する震源断層を断層面として表現
 - 断層面を要素断層に分割
 - 各要素断層に、すべり量，破壊時刻，応力降下量などを設定
 - 各要素断層から放射される地震波を対象地点において重ね合わせ
- ☞ 震源物理を反映した基準地震動設定が可能に



断層モデルによる地震動合成法の概要

$$\boxed{U(t)}_{\text{大地震}} = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \frac{r}{r_{ij}} F_{ij}(t - t_{ij}) \cdot \boxed{u(t - t_{ij})}_{\text{小地震}} \quad (1)$$

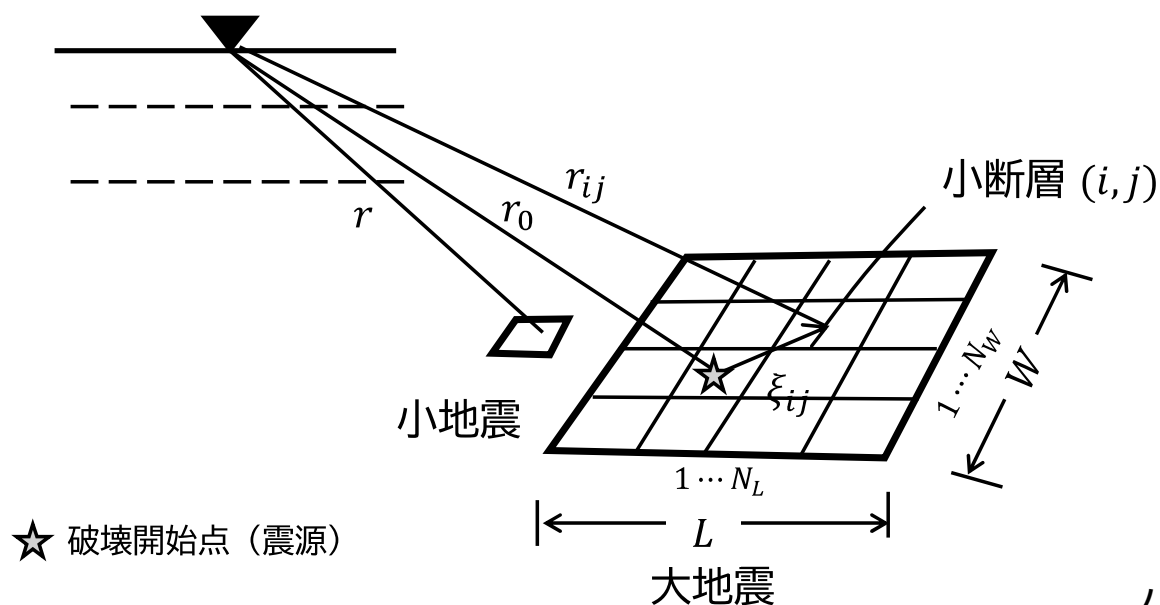
ここで,

$$F_{ij}(t) = \delta_{ij}(t) + D e^{-t/T} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2)$$

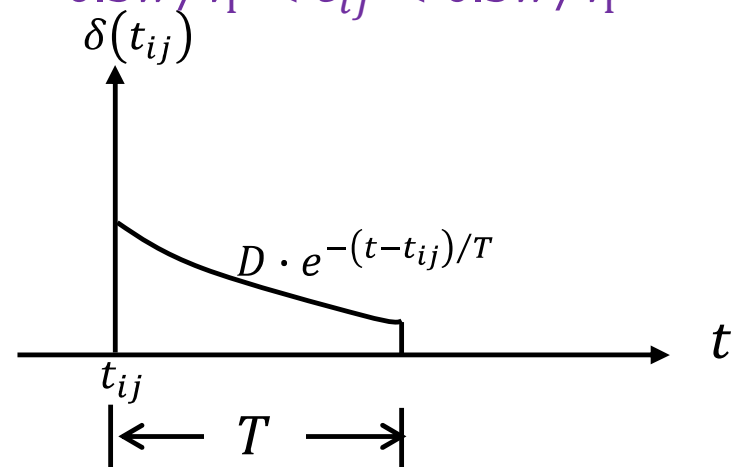
$$t_{ij} = r_{ij}/V_S + \xi_{ij}/V_R + \boxed{\varepsilon_{ij}} \quad (3)$$

人工的な周期性を防ぐための一様乱数

$$-0.5w/V_R < \varepsilon_{ij} < 0.5w/V_R$$



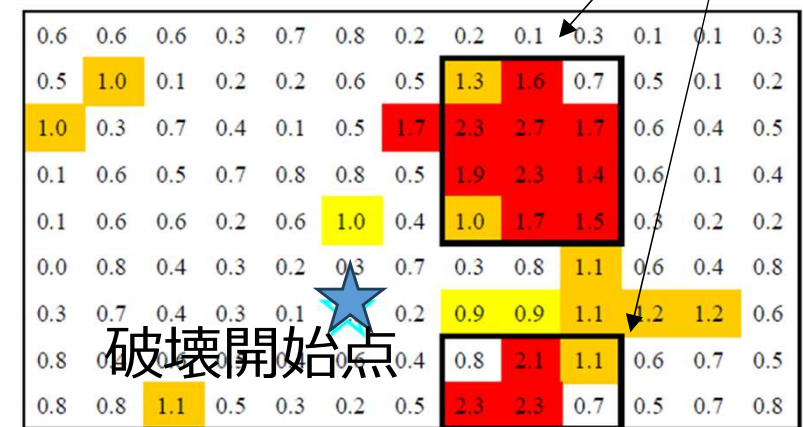
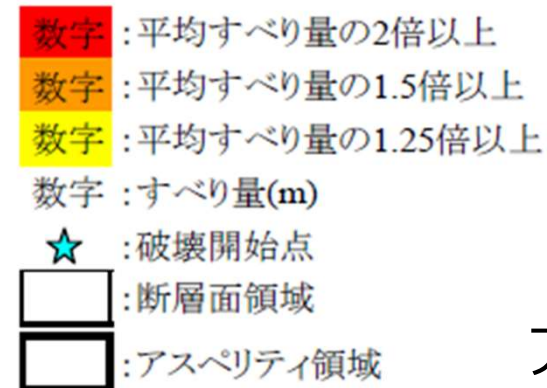
断層モデルを用いた地震動合成法の模式図



小地震から大地震の要素断層の地震動を求める時間方向の重ね合わせ $F_{ij}(t - t_{ij})$

地震動特性を決める要素

- 地震動を決める要素
 - 震源特性
 - 伝播経路特性
 - サイト増幅特性
 - 断層モデルによる地震動予測
 - 特性化震源モデル（震源特性）
 - 伝播経路特性・サイト増幅特性を反映したグリーン関数
-
- 経験的グリーン関数法
 - 適切な小地震の観測記録がある場合
 - 実際の伝播経路特性およびサイト増幅特性を反映
 - 統計的グリーン関数法
 - 適切な観測記録がない場合
 - 長周期成分を計算する理論的手法（波数積分法等）とのハイブリッド法が採用されることが多い



震源の特性化の例
(2005年福岡県西方沖地震)

(参考) 「レシピ」に基づく地震動予測

- 強震動予測手法の構成要素について、**現時点で最適と判断される手法や考え方が取りまとめられたもの**
 - 震源断層パラメータ設定
 - 地下構造モデル作成
 - 強震動計算
 - 予測結果検証

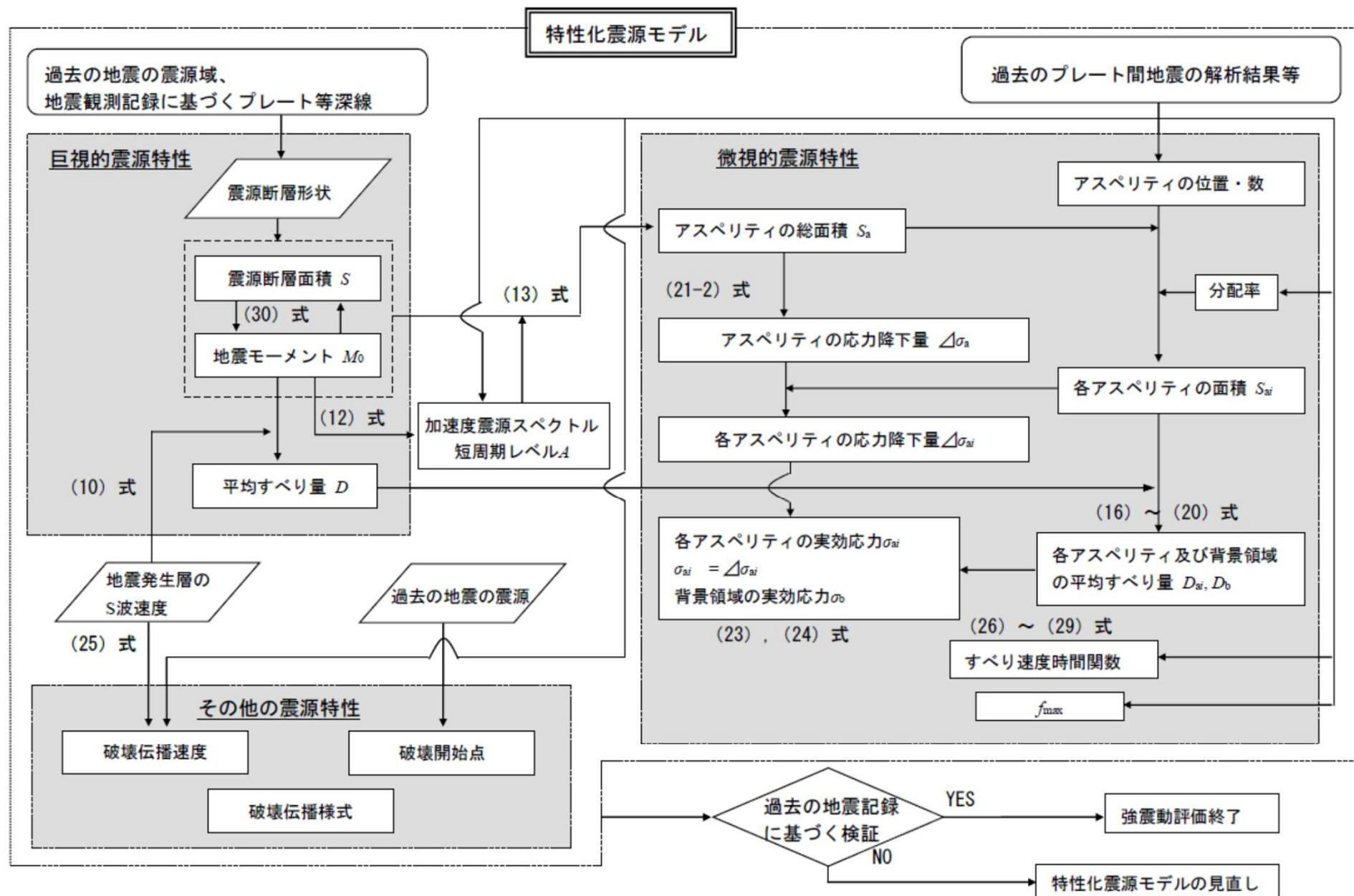
震源断層を特定した地震の強震動予測手法
(「レシピ」)

Strong ground motion prediction method for earthquakes with specified source faults
(“Recipe”)

令和2年(2020年)3月
地震調査研究推進本部 地震調査委員会

March, 2020
Earthquake Research Committee,
The Headquarters for Earthquake Research Promotion

(参考) 「レシピ」に基づく地震動予測



付図5 プレート間地震の震源特性パラメータ設定の流れ

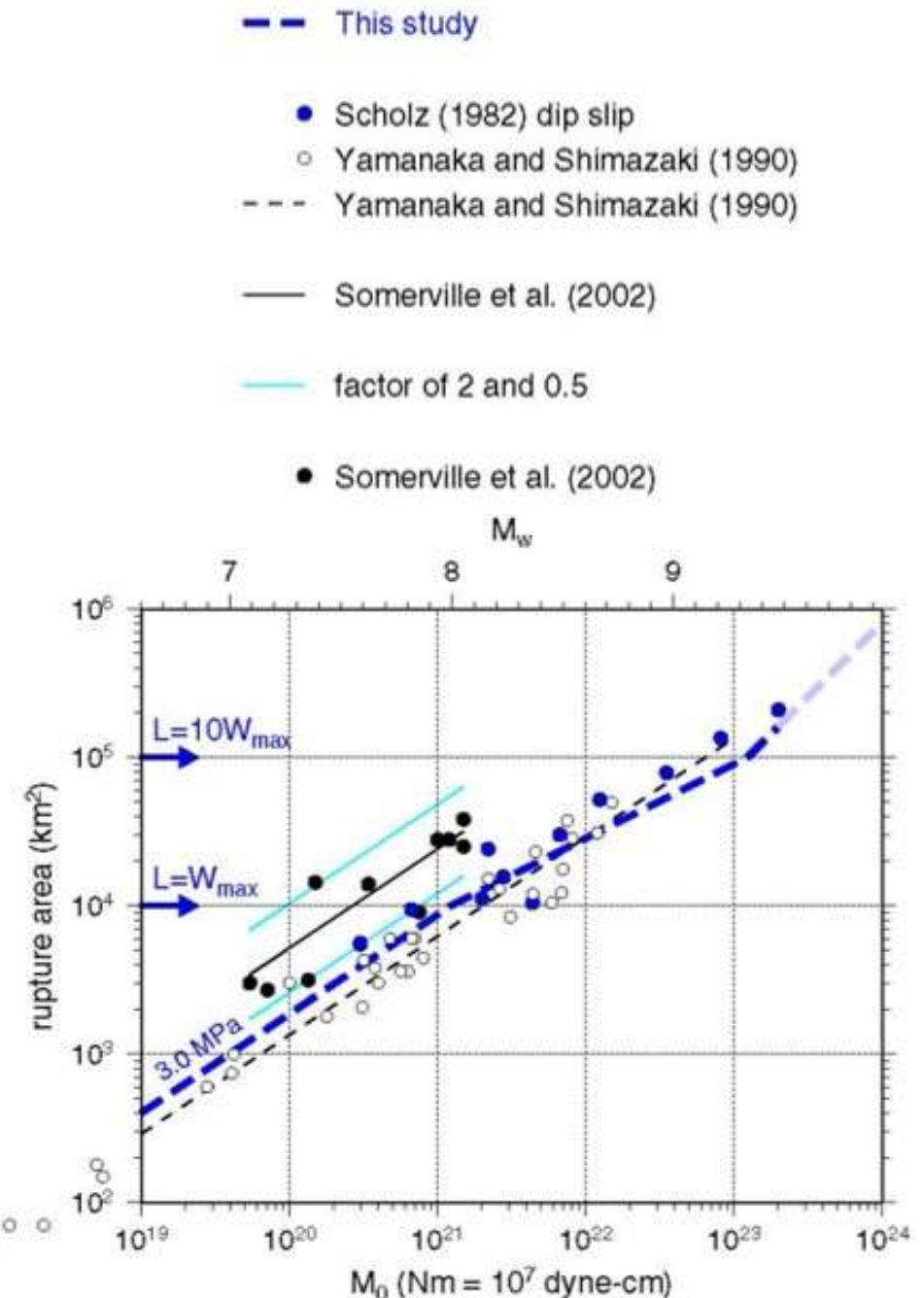
スケーリング則

- スケーリング則

- 「断層面積」と「地震モーメント」の関係などの経験則
- 複数のモデルが提案
- 基準地震動の策定では既往知見に基づき適切と判断されたスケーリング則を採用
- 他のスケーリング則を採用した場合の影響（認識論的不確実性）の把握も重要

- 他の地震動予測に係るパラメータ

- 断層形状（断層上端・下端深さ、傾斜角…）、アスペリティの位置・面積、破壊開始点、破壊伝播速度、地盤増幅特性…



地震モーメントと断層面積の
スケーリング則（経験的關係）

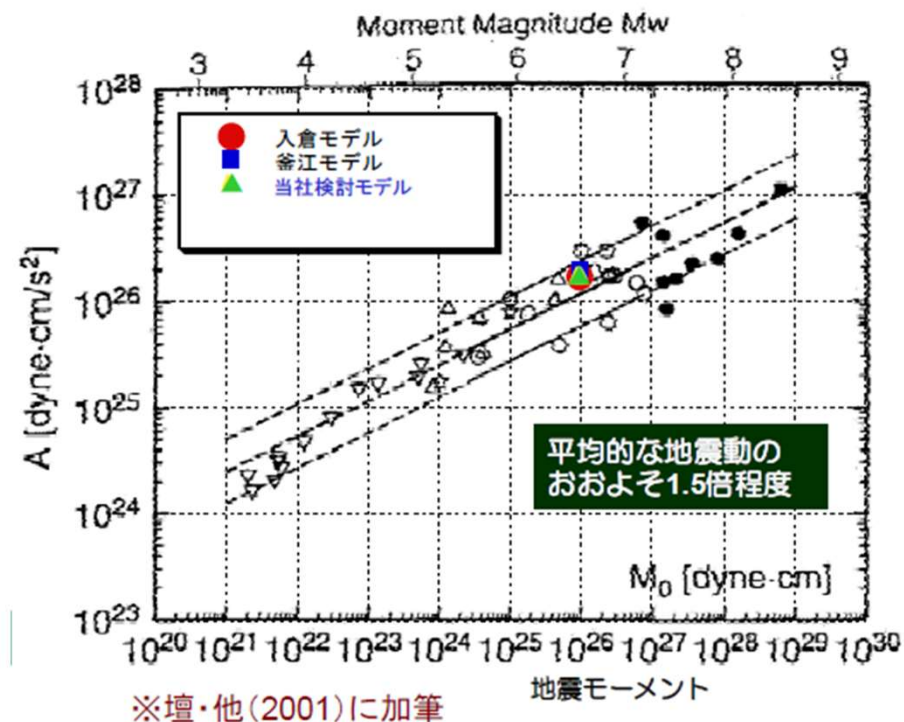
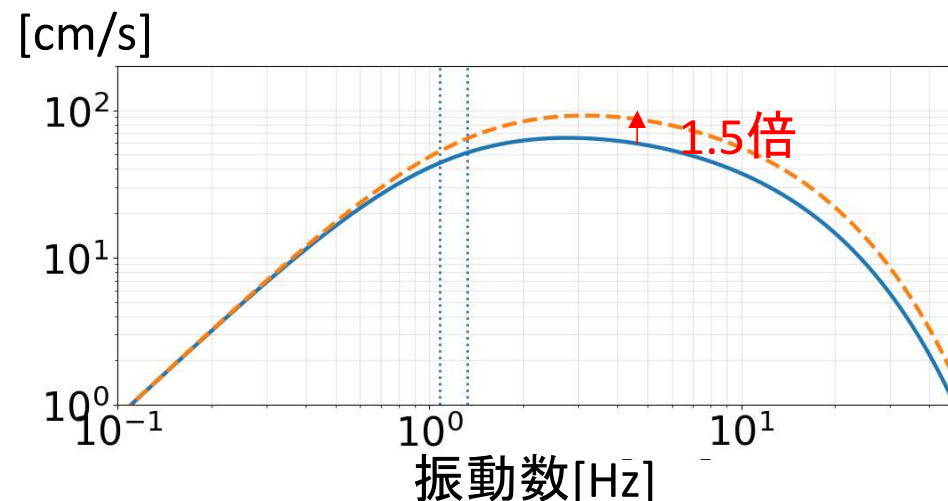
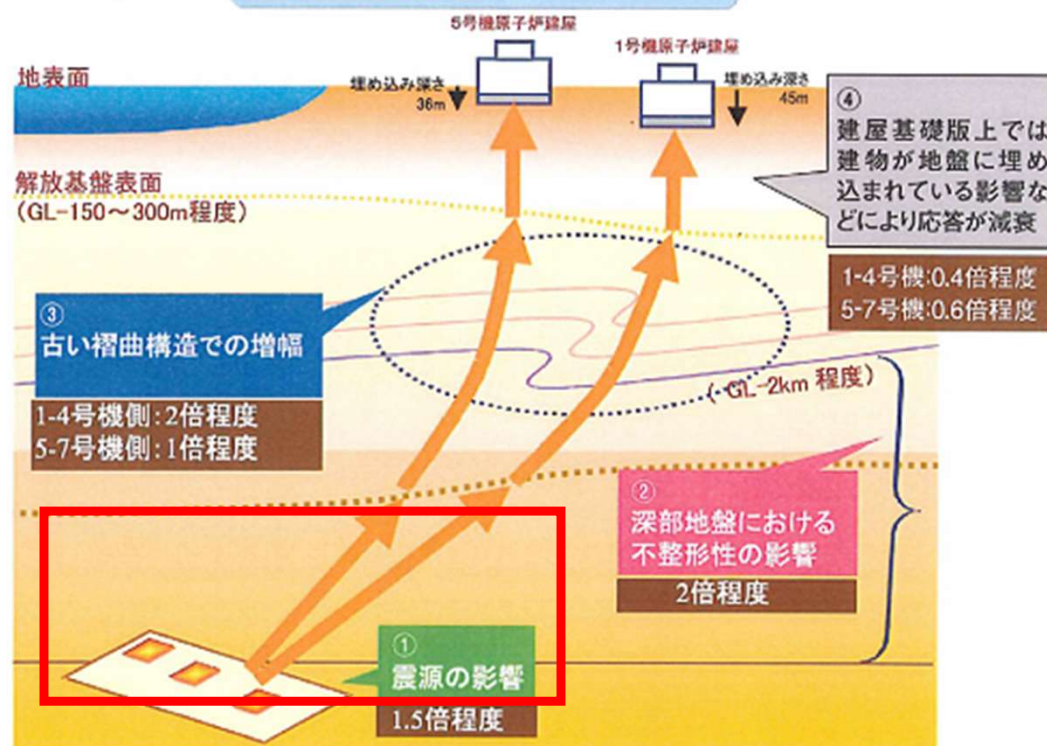
地震動予測に係る不確実性

- 二種類の不確実性
 - 自然現象に固有のランダム性に起因する**偶然的不確実性**
 - 知識不足やモデル選択の差異に起因する**認識論的不確実性**（例：前述の「スケーリング則」の選択）
- 審査ガイド（原管地発第1306192号）
 - 「地震動評価に大きな影響を与えられ**支配的なパラメータ**について分析した上で、**必要に応じて不確かさを組み合わせる**などの適切な手法を用いて評価すること」が要求
 - 規制審査では、震源特性、伝播経路特性、サイト特性に関わる不確実性が、偶然的不確実性と認識論的不確実性の両面から適切に整理・反映されているかを確認
- 現状の規制審査における標準的な考え方
 - 事前の調査や経験則（例：スケーリング則）等から設定できるパラメータについては、パラメータごとに不確実性を考慮
 - 事前の調査や経験則等から設定が困難なパラメータ（例：アスペリティ、破壊開始点）については、重畳させて不確実性を考慮

(参考) 2007年新潟県中越沖地震

- 柏崎・刈羽において観測記録が設計用限界地震動 S_2 を上回った原因を、断層モデルを用いて分析
 - 審査ガイド：「アスペリティの応力降下量（短周期レベル）については、新潟県中越沖地震で得られた知見を踏まえた不確かさが考慮されていることに留意する必要がある。」と記載

地震動が大きくなった要因の概念図

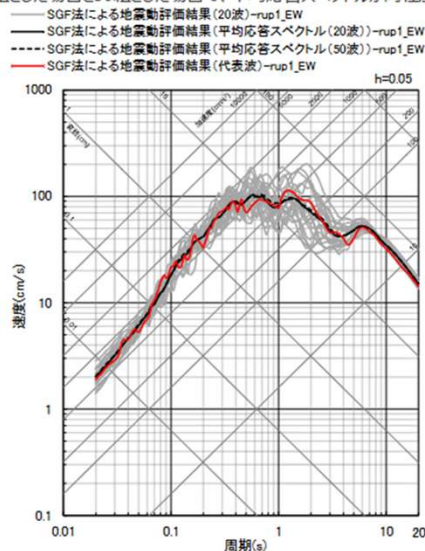


統計的グリーン関数法における擬似乱数の取り扱い

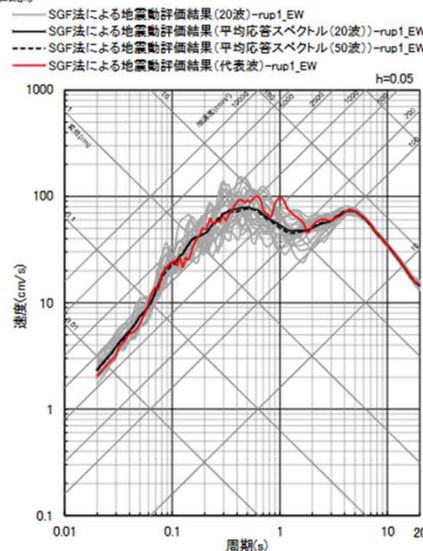
- 今回の不適切事案の対象となった統計的グリーン関数法における乱数設定
 - 他の震源パラメータの設定に比較して、地震動に与える影響は相対的に小さい
 - 審査過程において取り扱いの説明を追加要求
 - 解析結果の図表等による説明がなされ、間接的に確認されるにとどまっていた

○統計的グリーン関数法による地震動評価結果では、乱数を変えた20組※の波形合成を行い、減衰定数5%の擬似速度応答スペクトル20組の平均値との残差（NS、EW、UDの合計）が最小となるものを代表波として選定する。
○例として、御前崎海脚西部の断層帯による地震（基本震源モデル）及びA-17断層による地震（基本震源モデル）の選定について、下図に示す。

※ 乱数を20組とした場合と50組とした場合で、平均応答スペクトルが同程度であることを確認。



（御前崎海脚西部の断層帯による地震（基本震源モデル））



（A-17断層による地震（基本震源モデル））

＜統計的グリーン関数法による地震動評価の代表波の選定の例＞

実際の手順と異なる説明を行ったことに対するコンプライアンス上の責任は重大

(参考) 不正の経緯

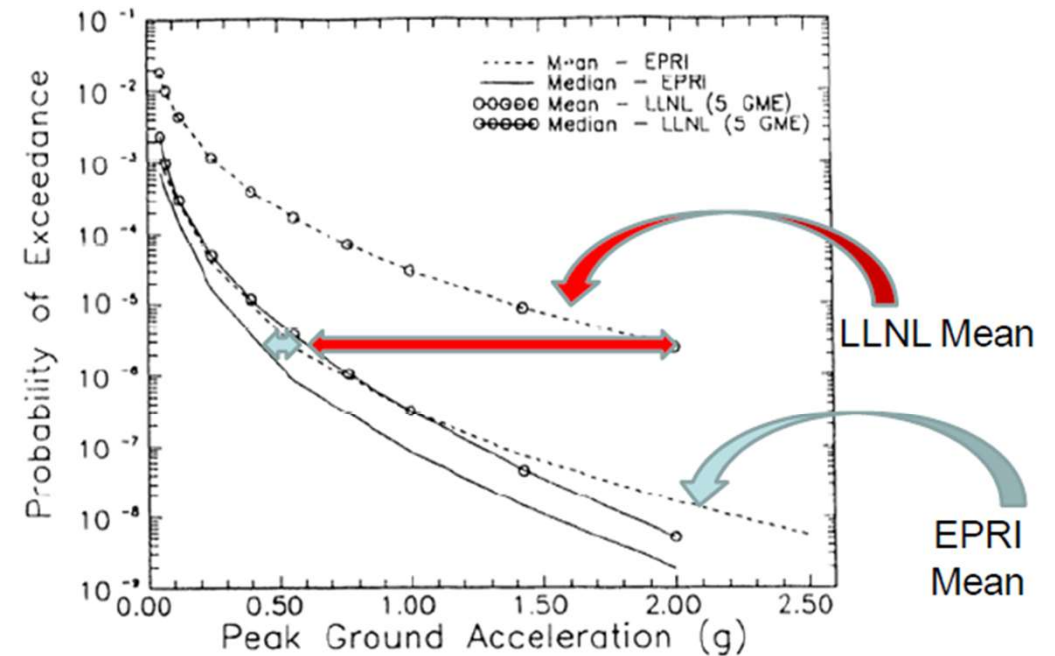
- 2015年7月：浜岡の基準地震動に対する本格的な審査が開始
- 2018年9月14日 第624回審査会合：
「これは先行のサイトでも当然確認をさせていただいているんですけども、統計的グリーン関数による地震動評価ですね、この計算が適切に行われているかどうかというのは、少し確認をさせていただきたいと思います。
(中略) 何波か何十波か計算をして、最終的には1波として結果をお示ししていただいているんですけども、
(中略) そのうちどのようなものを最終結果として示しているのかとか、(中略) そういったものも少し資料としてまずは示していただきたいと思っておりますので、その点、よろしくお願いします。」

ここまでのまとめ

- 地震動予測には多くの不確実性
 - 2006年指針改訂における「残余のリスク」の導入
 - 基準地震動を超える地震動が発生する可能性
- 詳細な活断層調査に基づく基準地震動策定
 - 2006年指針改訂における断層モデルによる地震動評価手法の導入
 - 2007年新潟県中越沖地震の検証
 - 「レシピ」による強震動予測
 - 審査ガイドにおける不確実性の取り扱い
- 地震動予測において、本来は自然現象の詳細な評価のために導入されたモデルやパラメータが、解析者によって異なる解釈を生じさせたり、調整可能な自由度として扱われる恐れも

米国の制度の変遷

- 安全停止地震動（Safe Shutdown Earthquake）の設定に確率論的地震ハザード評価（PSHA）を活用
 - PSHA における不確実性の適切な扱いが重要な課題
 - 1989 年にLLNLとEPRIが実施した地震ハザード評価との間で、特に不確実性の扱いの観点から大きな差異



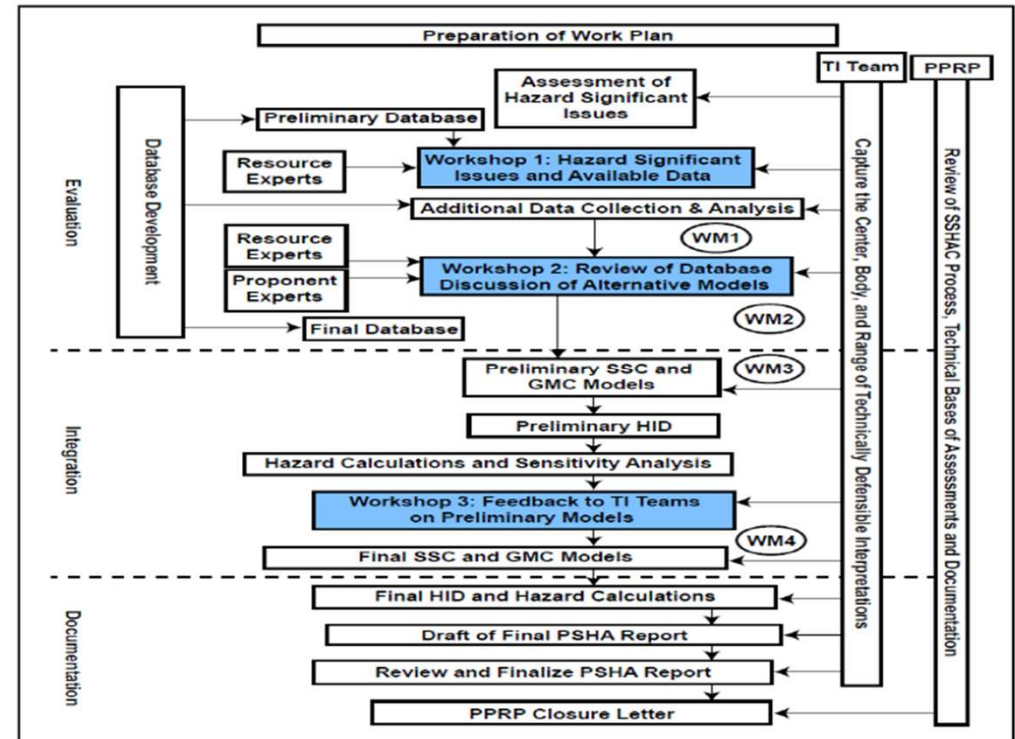
Very different results, in terms of mean hazard and associated uncertainty, from the two studies for a single NPP site

図-3 異なる機関による確率論的地震動ハザード曲線の相違 ([6] K. J. Coppersmith (2015))

酒井(2016) 電力中央研究所報告, O15008 より抜粋

Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC) の設置とNUREG発刊

- EPRI, DOE, USNRC共同で検討委員会（SSHAC）を設置
- 「技術的側面」そのものだけでなく、「手続き的な側面」が大きく影響と結論
- PSHA実施の標準的手続きを定める NUREG/CR-6372が策定
 - ワークショップの実施
 - 参加型ピアレビュー
 - スポンサーである事業者，専門家を含む参加者の役割分担を明確化
 - 判断プロセスと評価結果の体系的な文書化
- 近年も継続的に更新
 - 規制機関の関与のあり方などについてもより明確化



IAEA No. SSG-9 (Rev. 1)

2.9. Structured expert interactions should be employed to avoid artificial influence of uncertainty estimates on the results. To address the diversity of scientific interpretations, the centre, body and range of the technically defensible interpretations should be properly captured. (中略) Also, adequate consideration should be given to uncertainties using suitable (e.g. conservative, best estimate) and credible models, methods and scenarios — based on the concept of technically defensible interpretations — as appropriate for the evaluation framework (i.e. deterministic or probabilistic) and the target confidence levels. The composition of the peer review panel should also reflect the size and complexity of the project generally.

2.9. 評価結果に与える**不確実性の影響**が、**ひとつごとに異なる（人為的な影響を及ぼす）ことを避ける**ため、**体系化された専門家間の意見交換**（structured expert interactions）を実施すべきである。**科学的解釈の多様性に対処**するため、技術的に妥当な解釈の中心的傾向（centre）、代表的な解釈（body）およびその範囲（range）を適切に捉えるべきである。（中略）また、評価の枠組み（すなわち、**決定論的評価または確率論的評価**）および目標とする信頼水準に応じて、技術的に妥当な解釈（technically defensible interpretations）の概念に基づき、適切な（例えば、保守的な、あるいは最適推定による）かつ信頼性のあるモデル、手法およびシナリオを用いて、不確かさを十分に考慮すべきである。

SSHACで体系化された考え方は確率論・決定論を問わずIAEA基準に反映

(参考) 決定論的／確率論的地震動評価

- 決定論的地震動評価
 - 評価地点周辺のすべての震源を考慮
 - それらの震源で地震の発生を条件とした地震動評価
 - 地震動予測に係る不確実性を考慮し、地震動を保守的（大きめ）に評価
- 確率論的地震ハザード評価
 - 評価地点周辺のすべての震源を考慮
 - それらの震源で地震の発生確率を考慮（その予測に係る認識論的不確実性を評価）し統合
 - 地震動予測に係る不確実性を考慮し、その平均像とばらつきを評価（その予測に係る認識論的不確実性を評価）

2006年指針改訂から20年を経て

- 1 F事故を教訓に策定された現行規制基準
 - 規制の強化
 - 基準地震動の策定に関する審査ガイド整備
 - 基本的な枠組みは2006年改訂の延長線上
- 一方，強震動予測技術や不確実性評価に関する研究は着実に進歩
 - 新たな技術的知見の継続的な取り込み
 - 規制制度や品質マネジメントのあり方についての継続的な発展
- 民間規格（JEAG 4601）や規制審査ガイドが，これらの新たな知見をどのように継続的かつ体系的に反映してきたのかを検証することは，1 F事故の教訓を踏まえても重要な論点の一つ

2006年指針改訂から20年を経た現在の論点

- 事業者自らが最新の技術的知見を継続的に収集・評価する仕組みを整備し，基準地震動の策定とその妥当性を説明・立証する仕組みを整備するという品質マネジメントの考え方が十分に定着しているか？
 - 米国のSSHACプロセスのように，最新の技術的知見を継続的に取り入れつつ，専門家判断の透明性，説明性および追跡性を確保する品質マネジメントの下で基準地震動を策定する仕組みについて，我が国ではこれまで十分に議論されてきたか？
- 規制当局からの指摘事項に対して事業者が回答する，いわゆる「宿題型」の審査プロセスとなる傾向はないか？
- 技術的な妥当性より，規制当局への説明や他事業者との整合性を重視することになっていないか？

「残余のリスク」概念のその後

- 学会での議論
 - 基準地震動を超える地震動を前提とした耐震設計や、リスク情報を活用した安全確保の考え方について、学会等で継続的に検討
 - 実務への影響や事業者の負担増加を懸念する意見
- 「残余のリスク」の規制を含めた実務での取り扱いの現状
 - 基準地震動の年超過頻度の参照にとどまる（注：PSHAの品質マネジメントについても基準地震動同様の課題）
 - 設計基準を超える事象への対応は制度上存在するものの、地震ハザードからプラント応答・事故シーケンス・リスクまでを一貫して定量評価し、その結果を設計・運用・継続的改善へ体系的にフィードバックする枠組みは限定的
 - 今回の事案についても、技術的判断の是非だけでなく、その判断が安全性に及ぼした影響を定量的に評価し、リスク情報に基づいて議論することも可能

まとめにかえて

- 今回の中部電力の事案の課題は、次のように捉える必要があるのではないか？
 - コンプライアンス上の問題（本日の議論では割愛）
 - 擬似乱数設定などの個別技術の問題　に加えて、
 - **高度な専門判断を組織としてどのように品質確保し、継続的に改善していくかという品質マネジメントの課題**
- 今後必要な対応
 - 再発防止を目的とした制度改正　にとどめず、
 - **技術、規制制度および品質マネジメントを継続的に発展させる契機として位置付けるべき**
- 1 F 事故後に目指された**自主的・継続的な安全性向上の理念が実現されているか？**という観点での議論
 - 最新の技術的知見を継続的に取り込み、**専門家判断の透明性・説明性を確保する仕組み**を構築すること
 - 設計基準への適合のみを重視するのではなく、リスク情報を活用すること