

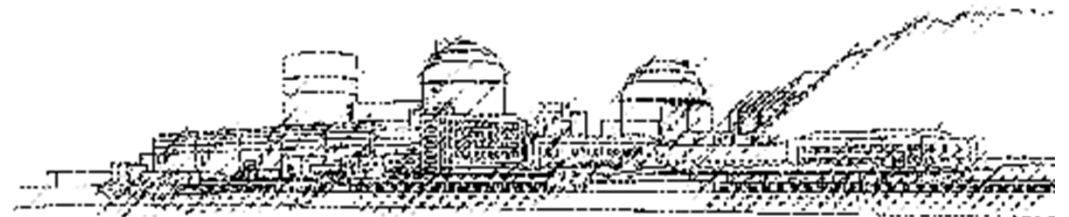
# 地震動評価の高度化に関する 最近の取り組み

## ～伊方SSHACプロジェクト～

(Senior Seismic Hazard Analysis Committee)

第54回(2021年度)日本原子力学会 貢献賞

松崎 伸一  
(四国電力)



伊方発電所の概要

伊方発電所の基準地震動

SSHACガイドラインの概要

伊方SSHAC PJの経緯と体制

モデル（ロジックツリー）の概要

ハザード評価結果と今後の課題

# 伊方発電所の概要

伊方発電所の基準地震動

SSHACガイドラインの概要

伊方SSHAC PJの経緯と体制

モデル（ロジックツリー）の概要

ハザード評価結果と今後の課題

# 伊方発電所の立地地点

○伊方発電所は佐田岬半島の北側，瀬戸内海側に立地。

PWR 56.6 56.6 89 万KW

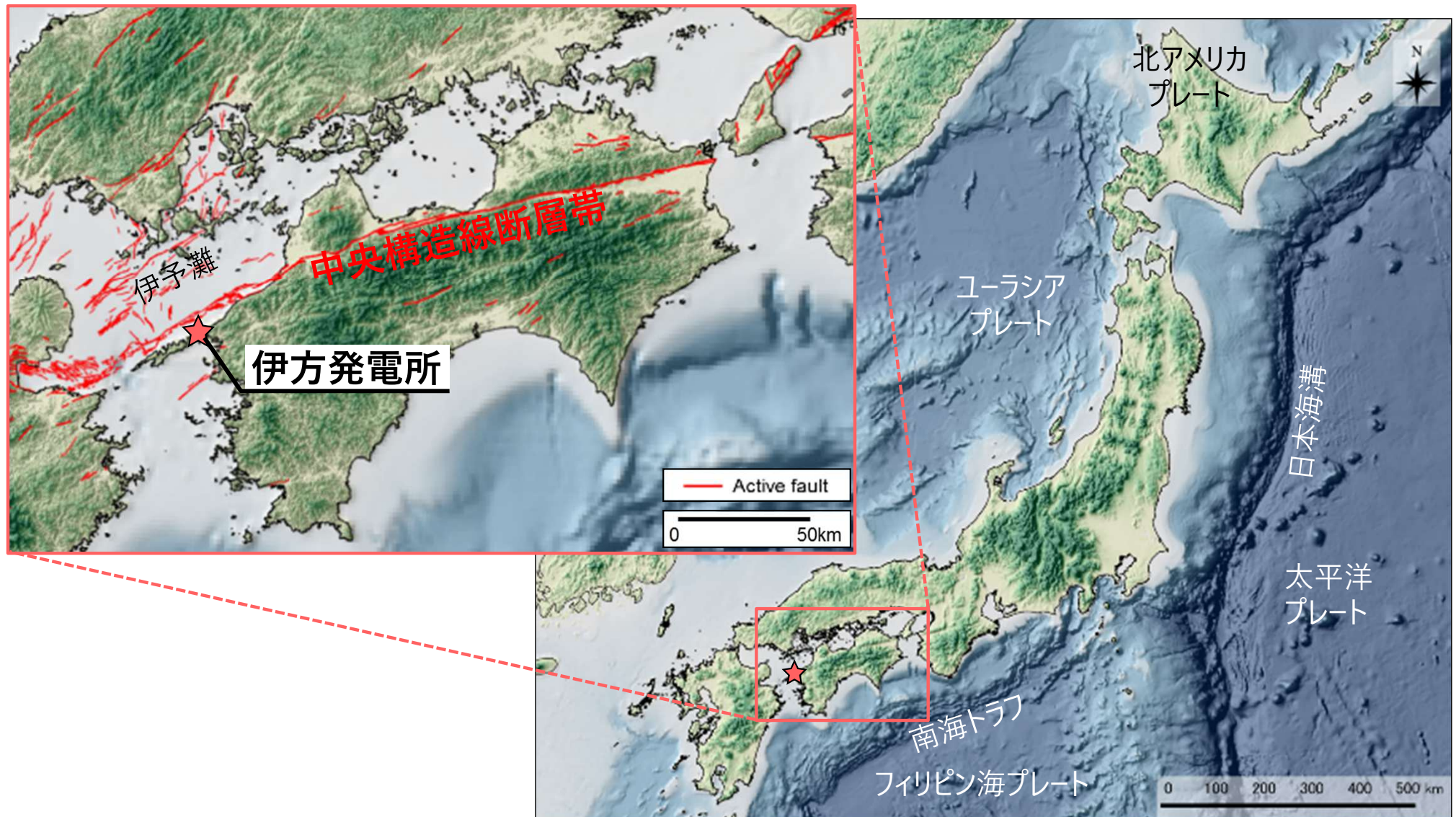
1号 2号 3号

北 ←

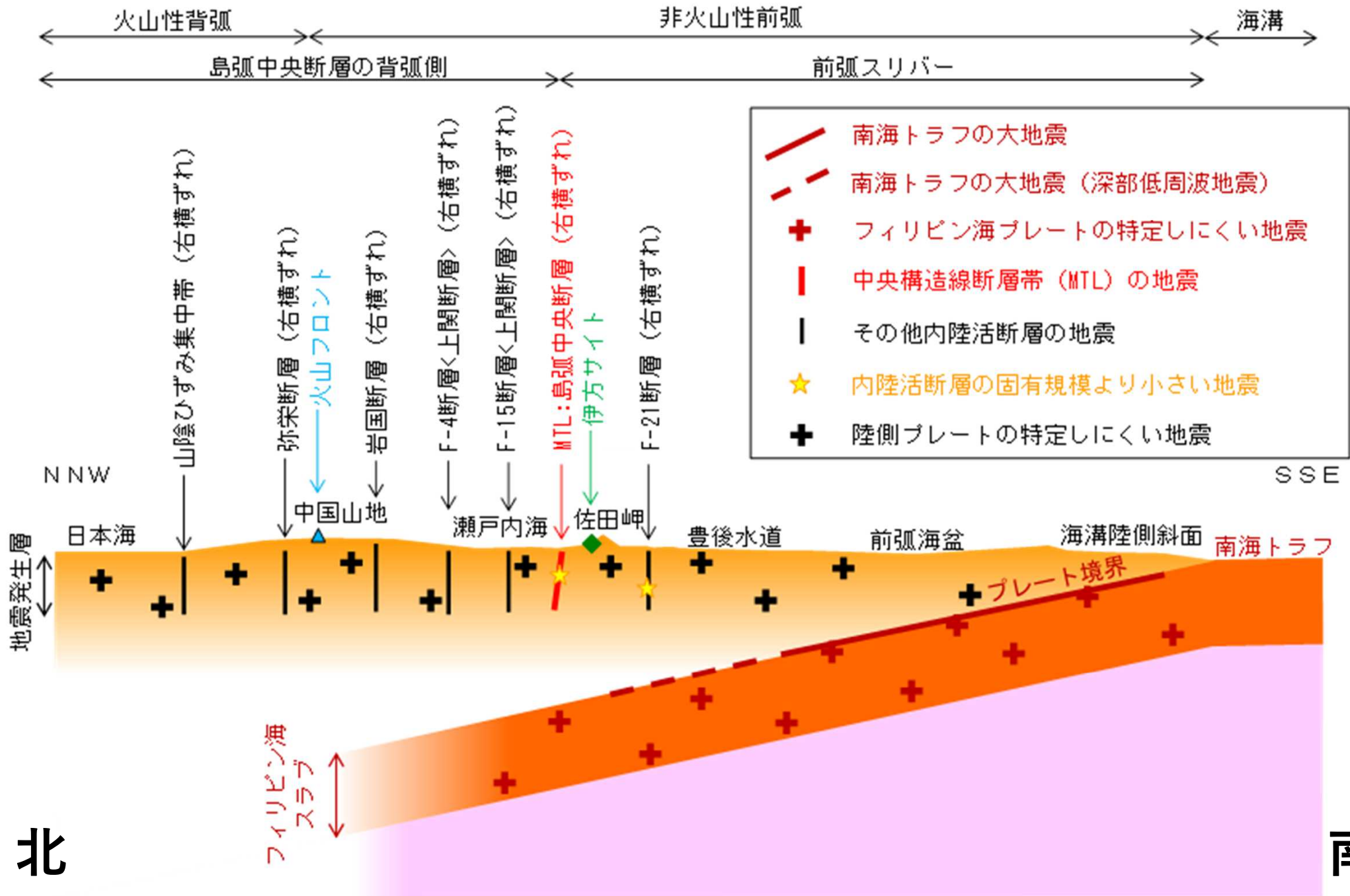


# 伊方発電所の立地地点と地震テクトニクス

- 伊方発電所は四国北西部に立地する。
- 発電所周辺で発生する主な地震としては、中央構造線断層帯による地震、フィリピン海プレート内部で発生する海洋プレート内地震及び南海トラフの巨大地震があり、地震動評価上、敷地沖合約8kmに位置する中央構造線断層帯による地震の影響が最も大きい。



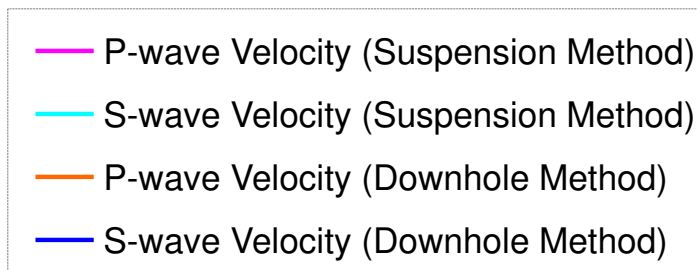
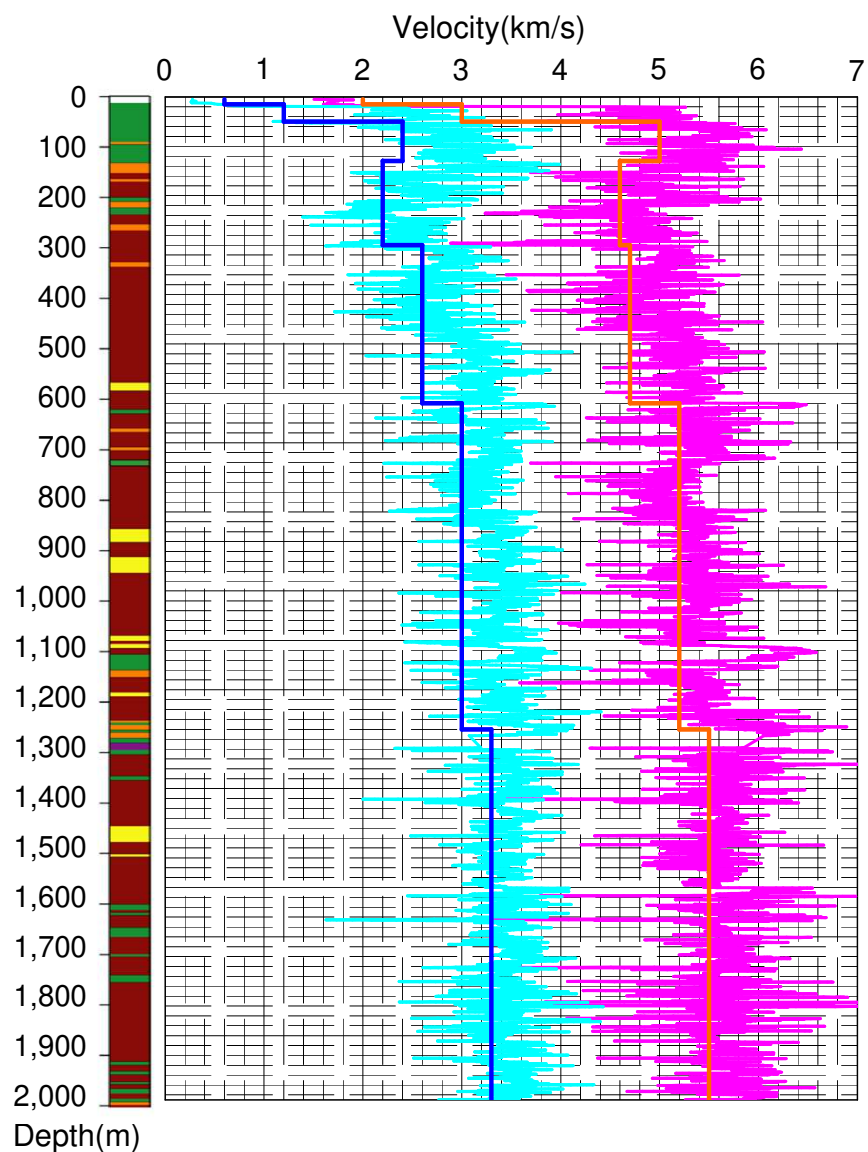
# 伊方発電所周辺の地震テクトニクス概念図



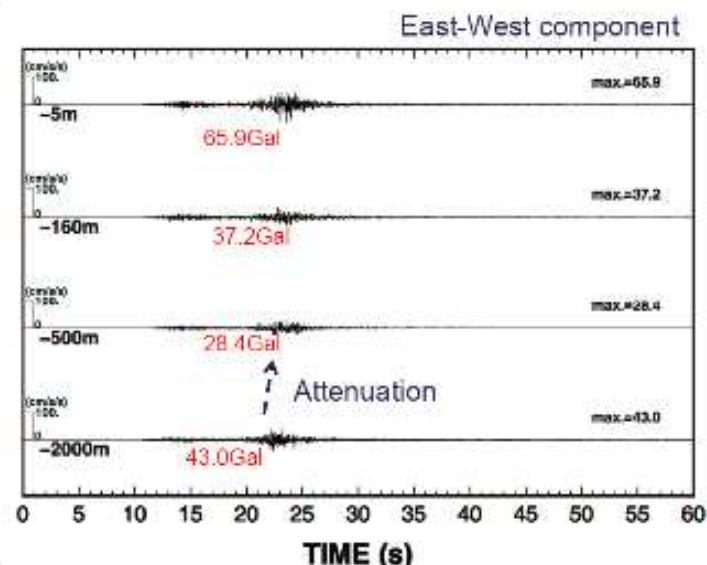
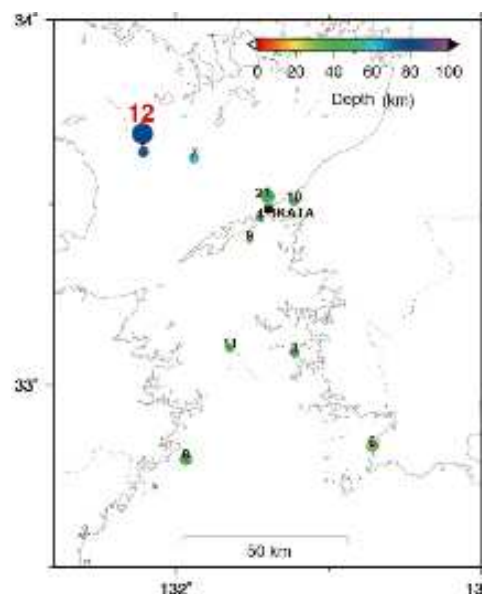
# 伊方発電所の地盤特性

○伊方発電所における弾性波探査から、伊方発電所の地盤は $V_s=2.6\text{km/s}$ と極めて堅硬な岩盤であり、特異な地盤増幅がないことが地下構造調査や地震観測から確認されている。

⇒伊方発電所の基準地震動は、標高10mの解放基盤 ( $V_s=2.6\text{km/s}$ ) で設定



2014年3月14日の地震  
MJ6.2 深さ78km



2010～2012年に2000mボーリングを実施し、地震計を設置

伊方発電所の概要

**伊方発電所の基準地震動**

SSHACガイドラインの概要

伊方SSHAC PJの経緯と体制

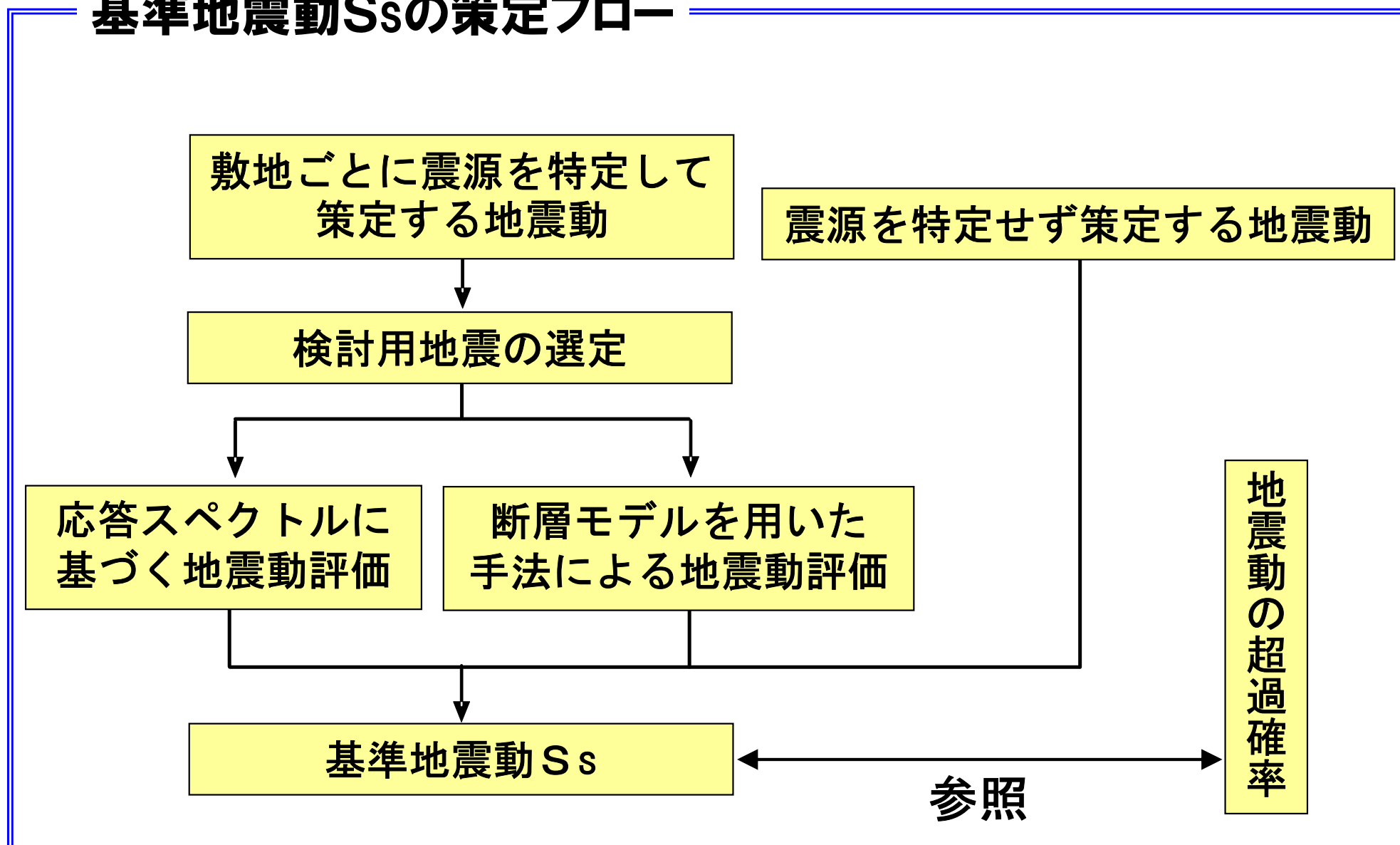
モデル（ロジックツリー）の概要

ハザード評価結果と今後の課題



## 原子力の安全規制における

### 基準地震動Ssの策定フロー



# 伊方発電所の基準地震動

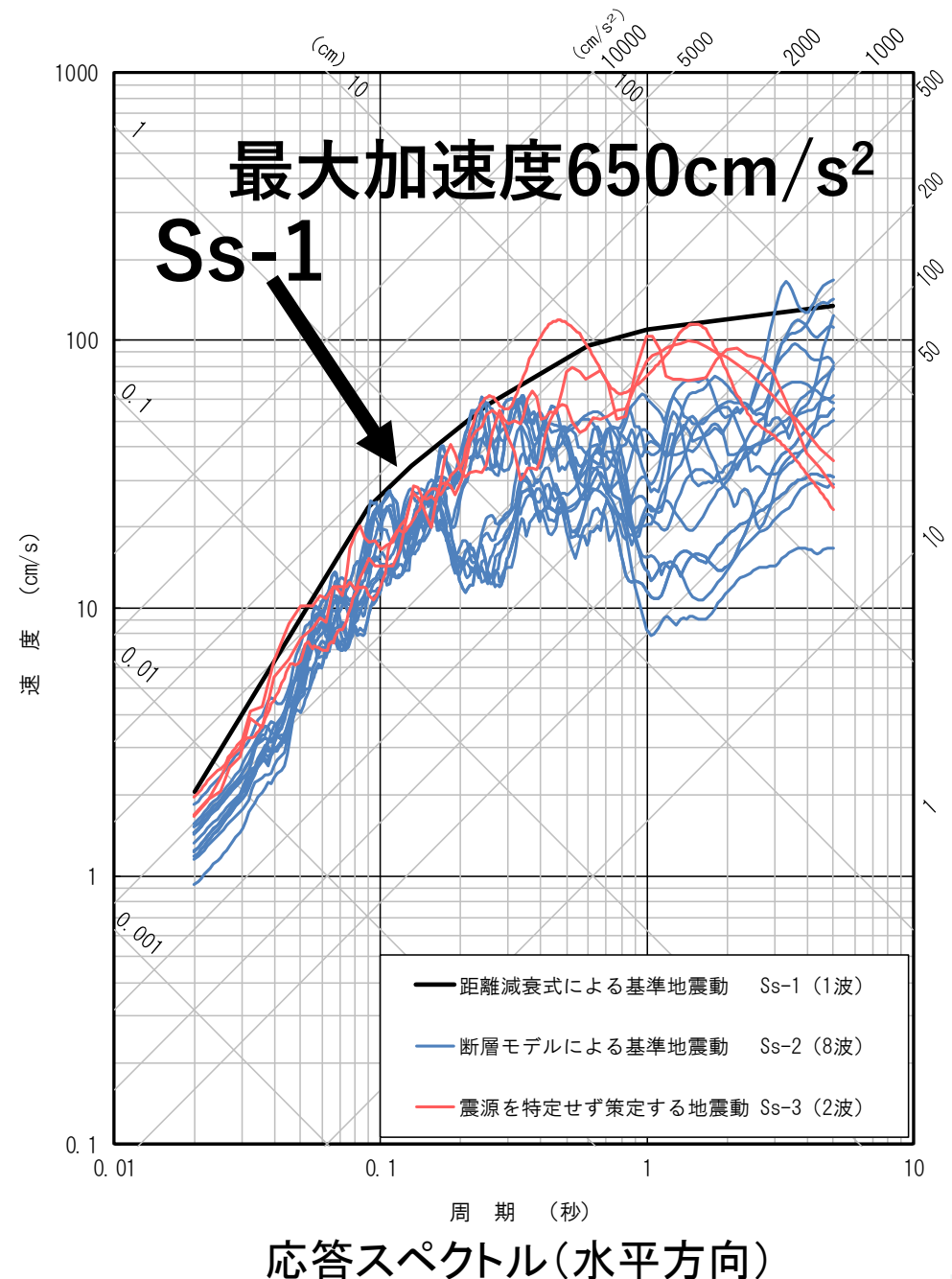
- 伊方発電所では、2011年東北地方太平洋沖地震の知見を踏まえて制定された原子力発電所の**新規制基準**に基づき、**決定論的な地震動評価**を行い、**11波の基準地震動**を策定した。
- その後、震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトルを1波追加。  
⇒全12波の基準地震動

## <中央構造線断層帯による地震>

- Ss-1 (距離減衰式(応答スペクトル)による評価)  
: 1波
- Ss-2 (断層モデルによる評価)  
: 8波

## <震源を特定せず策定する地震動>

- Ss-3 (観測記録に基づく評価)  
(標準応答スペクトル)  
: 2波
- : 1波



# 伊方発電所の基準地震動Ssの変遷



中央構造線 基本ケース の長さ	設定なし	46 km	54 km	480 km 130 km 54 km
地震規模	M7 程度	M7.2 程度	M7.6	M8.5
基準地震動の 最大加速度	300 cm/s <sup>2</sup>	473 cm/s <sup>2</sup>	570 cm/s <sup>2</sup>	650 cm/s <sup>2</sup>
基準地震動の 継続時間	10～30 秒	約28 秒	約52 秒	約110 秒

## ●設計地震動

### 1. 設計地震波

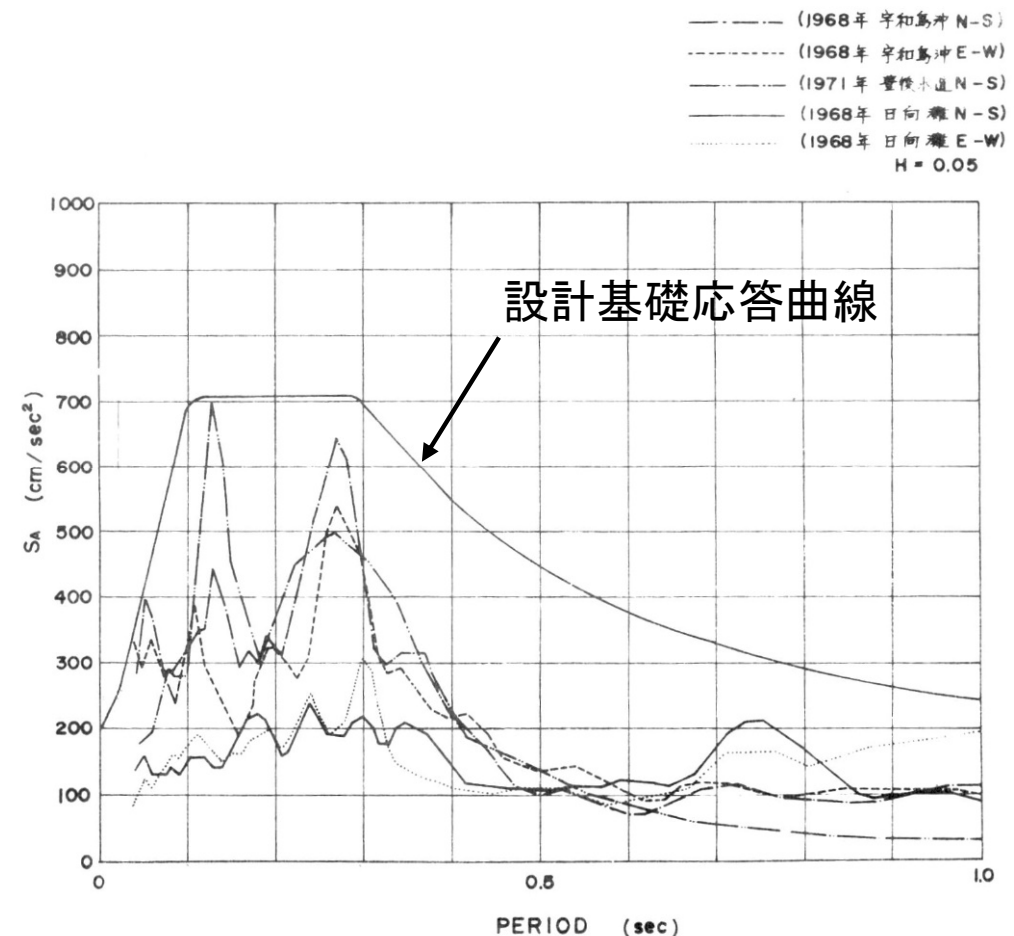
- ・敷地直下30kmにM7.0の地震を想定し、予測される最大加速度186ガルから、設計地震波の**最大加速度を200ガル**と設定し、時刻歴波形としては、  
1968年宇和島沖地震における宇和島の記録を200ガル正規化  
1971年豊後水道地震における伊方での記録を200ガル正規化

### 2. 設計基礎応答曲線

- ・上記設計地震波の加速度応答スペクトル（5%減衰）を包絡するように設定（最大加速度200ガル）

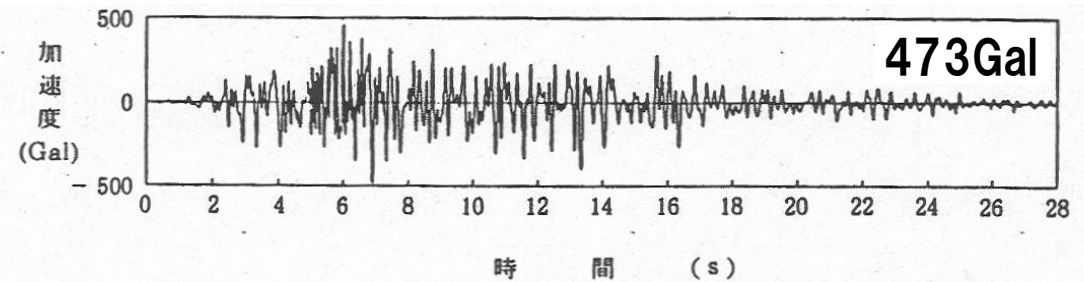
## ●安全余裕検討用地震動

- ・原子炉格納容器・原子炉停止装置については、**設計地震動の1.5倍（300ガル）**の地震動に対して安全機能が保持されることを確認する
- ・仮に**中央構造線**に地震が発生したとしてもM7程度と想定され、施設の安全性が損なわれることはない（**安全余裕検討用地震動に収まる**）と判断

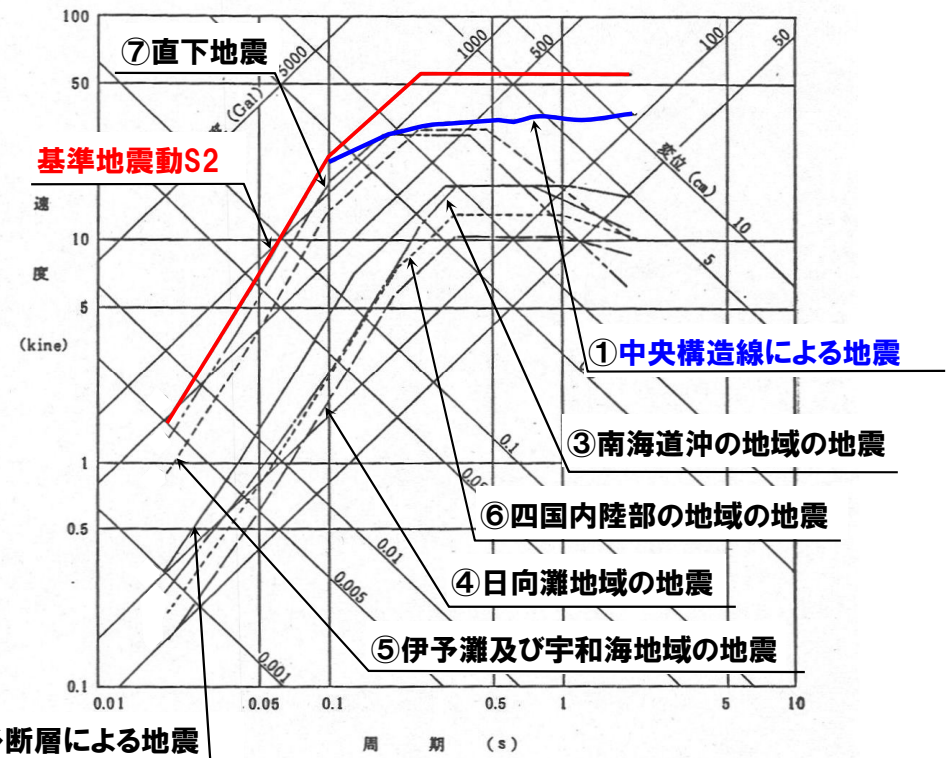
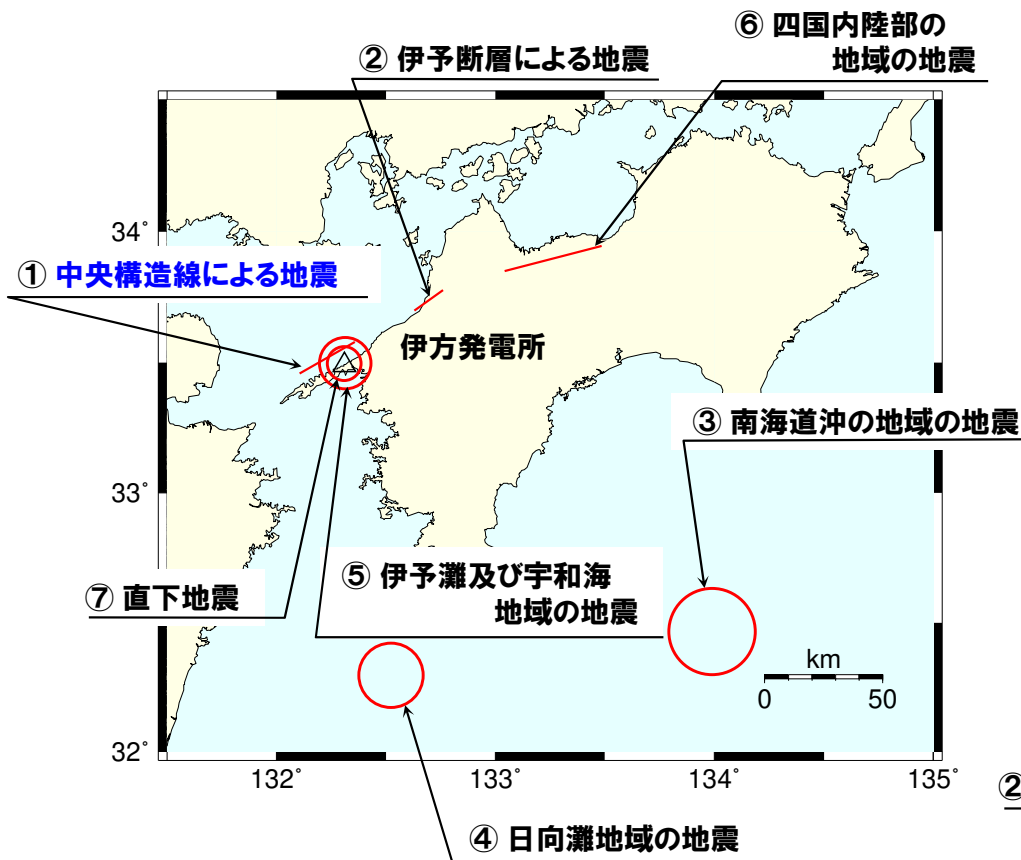


## ● 基準地震動S2

- 敷地前面海域の中央構造線の長さを46kmと評価し，断層モデル解析を行い，これを包絡するようにS2を策定

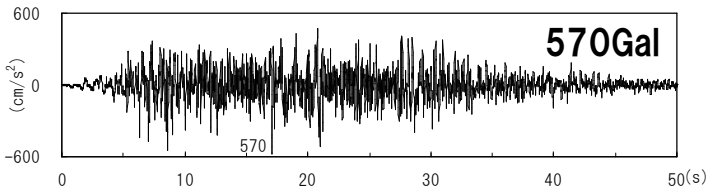
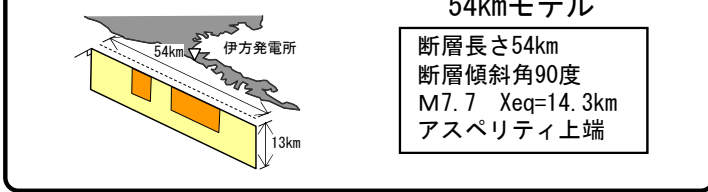


基準地震動S2の時刻歴波形

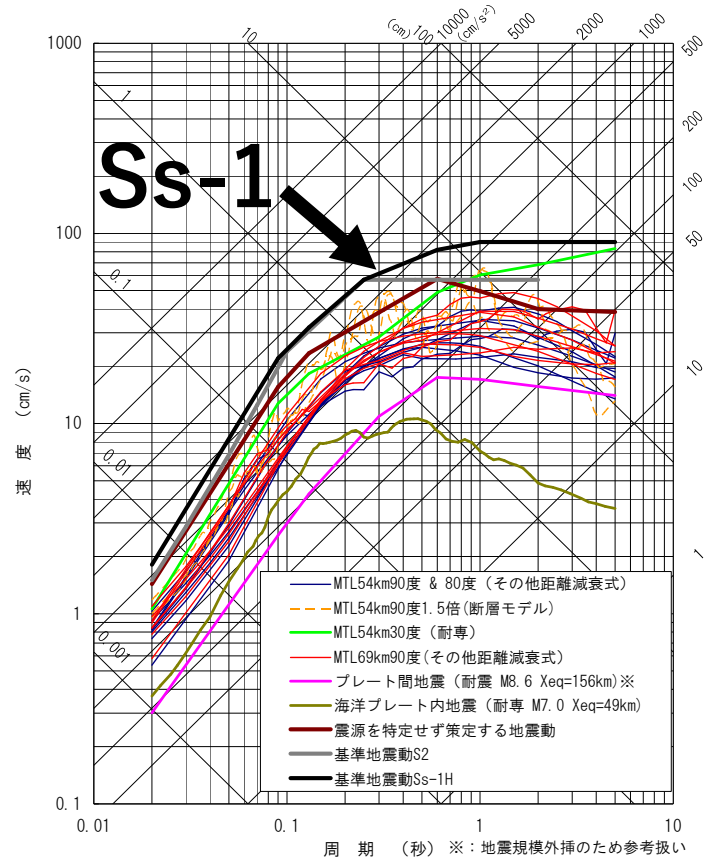


基準地震動S2の応答スペクトル

## 基本震源モデル

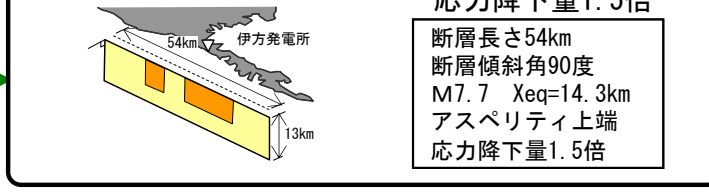


基準地震動Ssの時刻歴波形



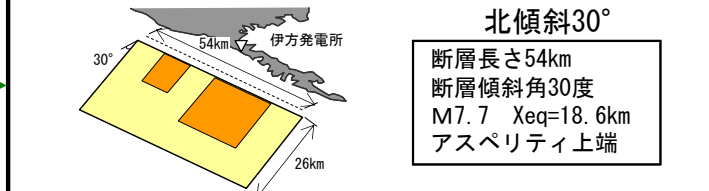
基準地震動Ssの応答スペクトル

## 不確かさ考慮①



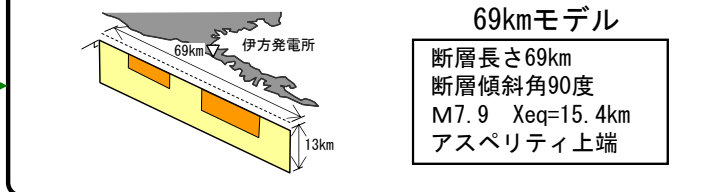
○応力降下量1.5倍を不確かさとして考慮

## 不確かさ考慮②



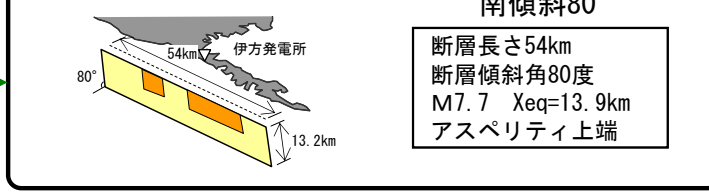
○活断層としての中央構造線断層帯が地質境界断層としての中央構造線と一致する可能性を考慮して北傾斜30度を想定

## 不確かさ考慮③

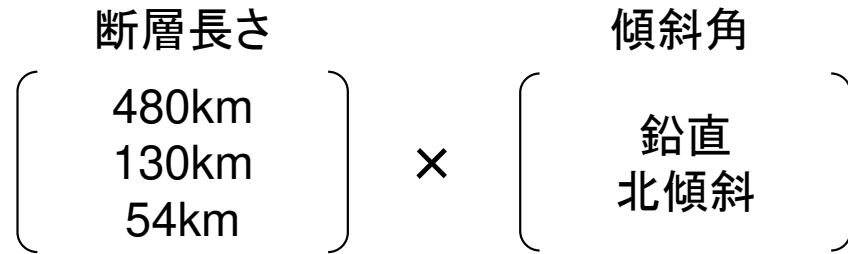


○安全側に、引張性ジョグの全長を含む領域に対してスケーリング則を適用する → 断層長さ69km

## 不確かさ考慮⑤

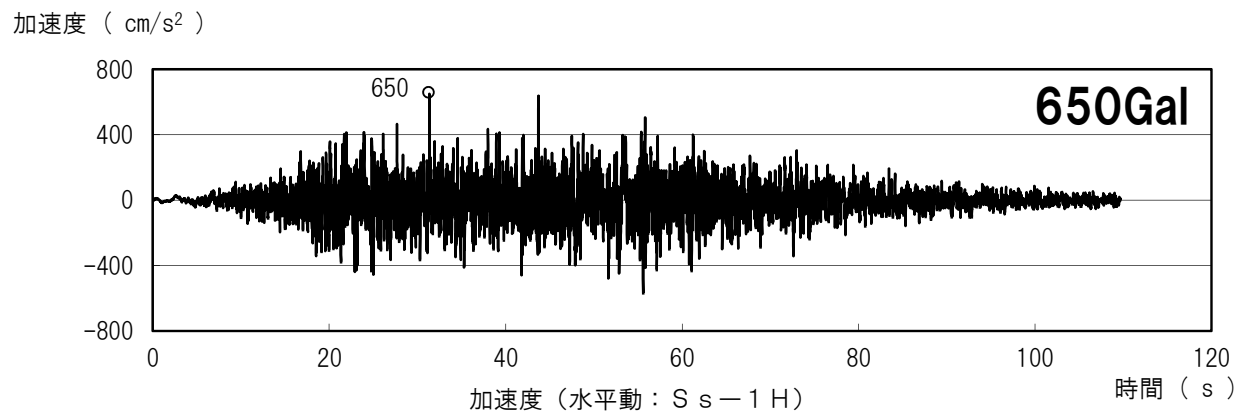


○角度のばらつきを考慮

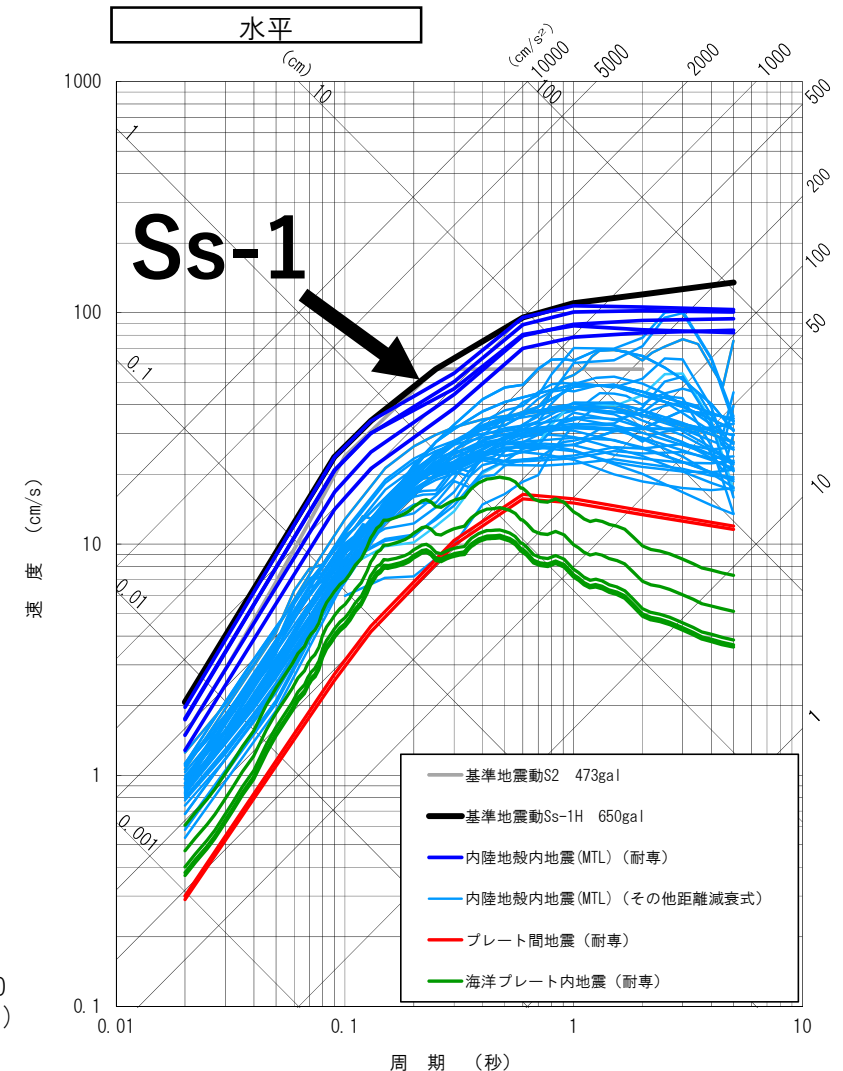


保守的に長さ69kmについても応答スペクトル評価を行う。

- 基本ケースとして，480km，130kmも設定
- 長周期側で570Galの基準地震動を超過
- 耐専スペクトルにおいて，内陸地殻内地震の評価に適用される補正係数（0.6倍）を保守的に適用しない方針としたことから，短周期側の地震動レベルもアップ



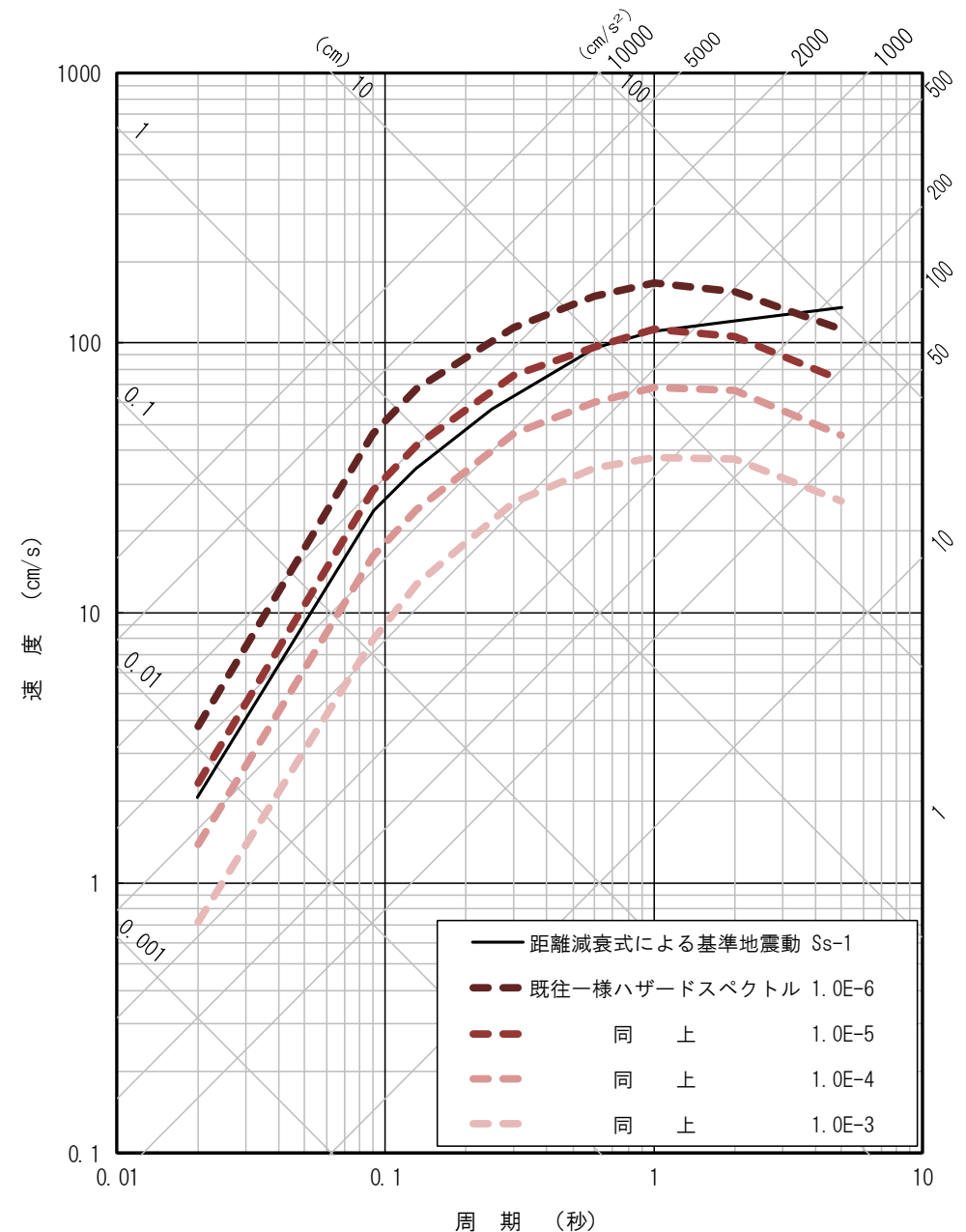
基準地震動Ssの時刻歴波形



基準地震動Ssの応答スペクトル

# 伊方発電所の基準地震動と既往ハザード評価の比較

○新規制基準において、確率論的評価は決定論的評価により設定した基準地震動の妥当性確認として参照する位置付けである。基準地震動を確率論的評価で求めた一様ハザードスペクトルと比較すると、基準地震動の年超過確率は概ね $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ 程度となった。



応答スペクトル(水平方向)



伊方発電所の概要

伊方発電所の基準地震動

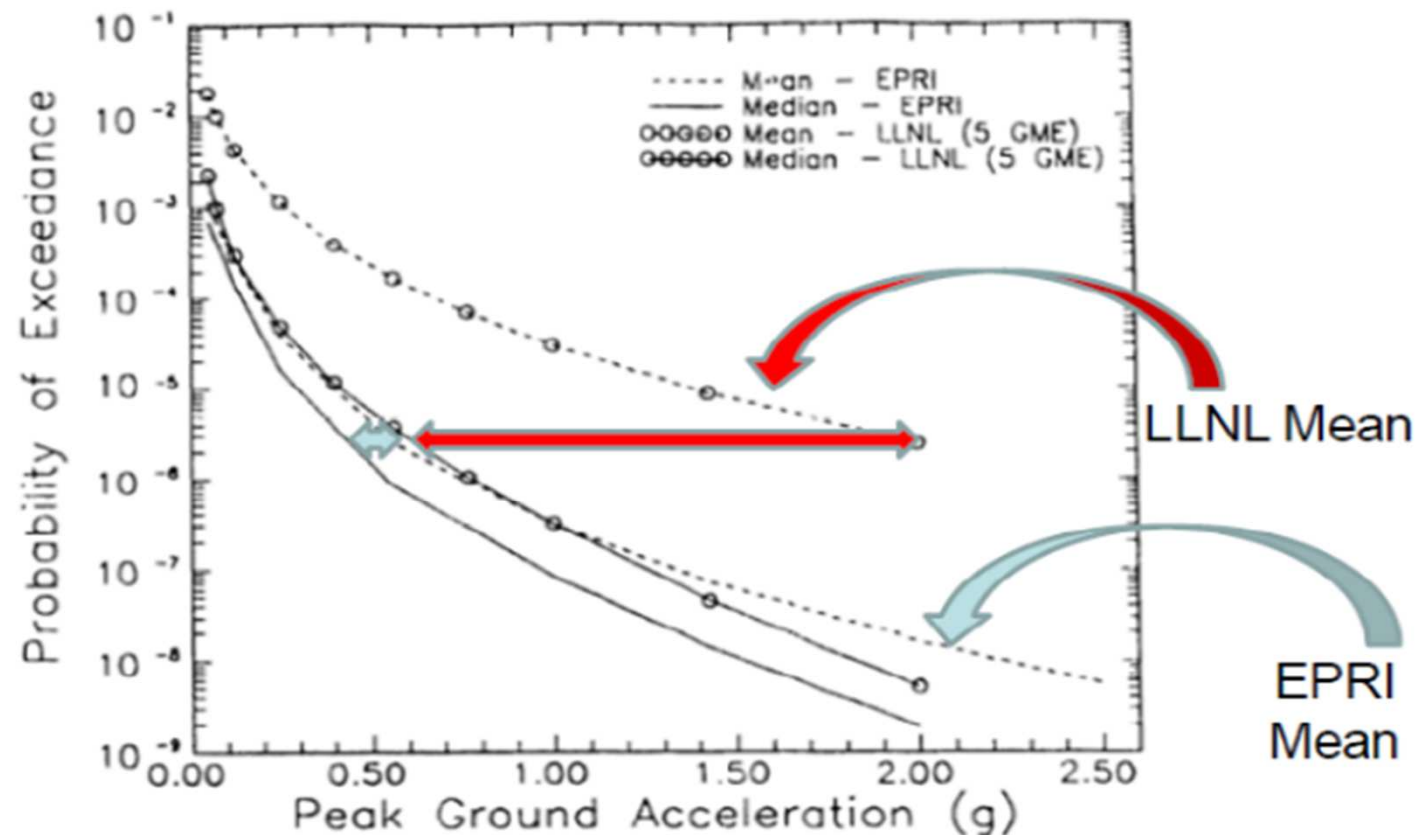
**SSHACガイドラインの概要**

伊方SSHAC PJの経緯と体制

モデル（ロジックツリー）の概要

ハザード評価結果と今後の課題

- 1980年代後半，米国電力研究所（EPRI）とローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）が米國中東部の同一原子力発電所の確率論的地震ハザード解析（PSHA）を実施した結果，**両者には大きな相違**があった。
- 特に**平均値は大きく乖離**するとともに，**不確かさの幅も大きく異なる**。
- 差異の原因等を検討するため，米国原子力規制委員会（U.S.NRC），米国エネルギー省（DOE），EPRIは共同で検討委員会として**SSHAC**（Senior Seismic Hazard Analysis Committee）を設置した。
- 差異の原因**は技術的な側面ではなく，**不確かさの検討手順**にあるとされた。こうした事例を踏まえ，評価の**説明性**や**透明性**を考慮し，**役割と責任の明確化**などの手順を定めたものが**SSHACガイドライン**である。（1997年：SSHACレポート）



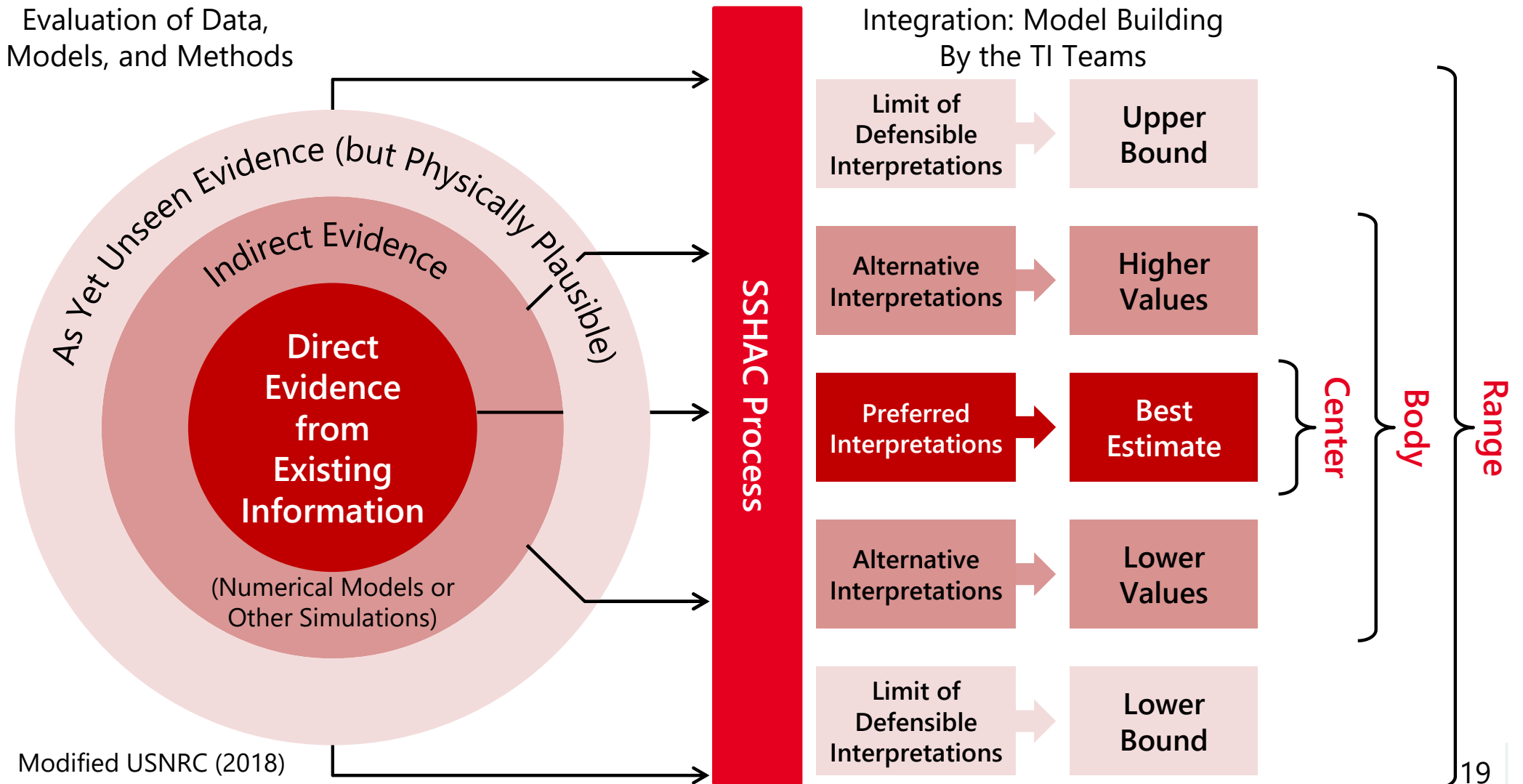
Very different results, in terms of mean hazard and associated uncertainty, from the two studies for a single NPP site

- SSHACガイドラインは、確率論的地震ハザード解析に関する技術的な検討項目を規定するものではなく、**検討手順（特に不確実さの評価に関する専門家の活用）の標準化**に力点があることが特徴的である。
- 検討対象の重要度や不確実さの程度から、**Level 1～Level 4**の4段階に分類されている。国際的に原子力施設に関しては**Level 3以上**で検討が実施されている。
- 現在までに、**原子力規制側の要求事項**として、スイス、南アフリカ、台湾、スペイン等の諸外国でSSHACガイドラインのLevel 3以上に準拠した評価が行われている。
- また、SSHACガイドラインは事例の蓄積等を踏まえ、適宜改訂されている（NRC, 2012；2018）。
- 伊方SSHACプロジェクトは、**SSHACガイドラインのLevel 3に準拠した国内初の試み**であり、NRC(2018)でもSSHAC Level 3に準拠する活動として認知されている。

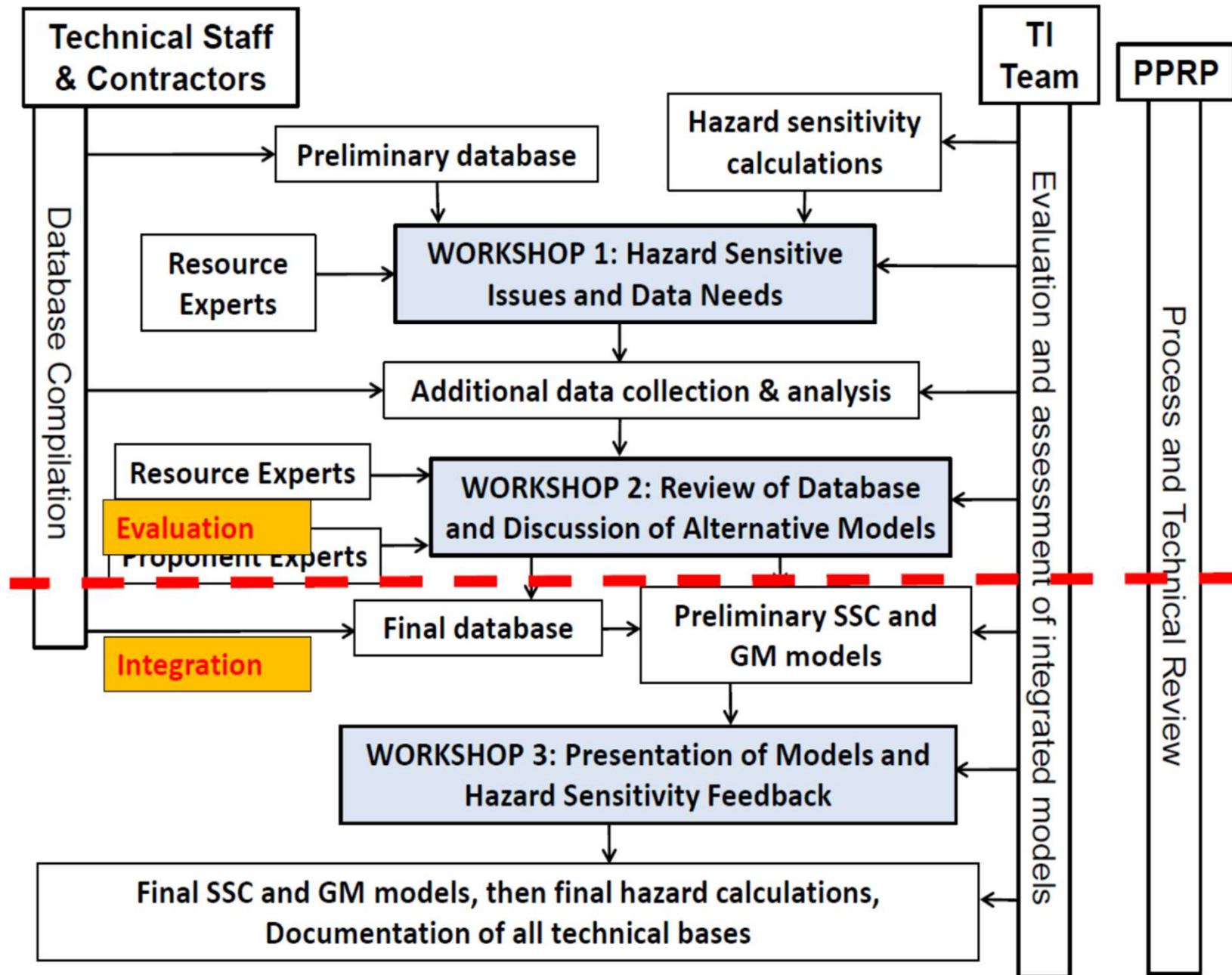
## SSHACガイドラインの概要

- ・ 検討実施者、データ提供者、モデル提案者等の**役割を含め検討組織を明確化**するとともに**各々の資質や選定の考え方を提示**
- ・ PSHAの標準的な**検討手順を明確化**
- ・ 検討全参加者での**議論のタイミング**、**当該のステップで議論すべき事項を明確化**
- ・ **ピアレビュー**は最終一括ではなく**参加型**とし、検討チームとレビューアーの議論のタイミング、内容等も明確化
- ・ 検討の**全過程を文書化**、**公開**

○SSHACガイドラインにおける最も重要な概念は「**CBR of TDI (Center, Body, Range of Technically Defensible Interpretation)**」：技術的に十分主張できる解釈に基づく中央，分布形，範囲」である。



○3回のWORKSHOPを中心として検討が進められる



伊方発電所の概要

伊方発電所の基準地震動

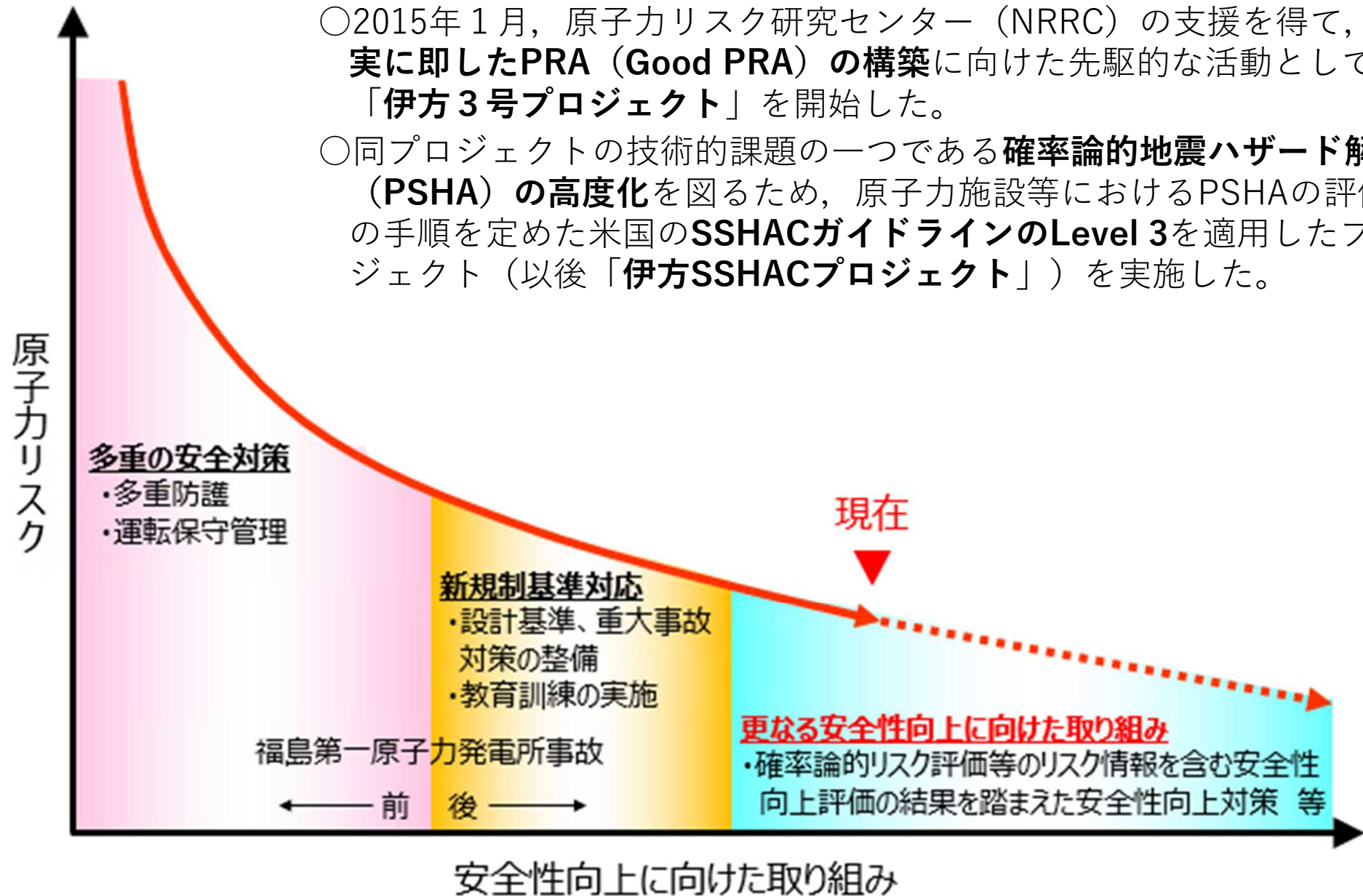
SSHACガイドラインの概要

**伊方SSHAC PJの経緯と体制**

モデル（ロジックツリー）の概要

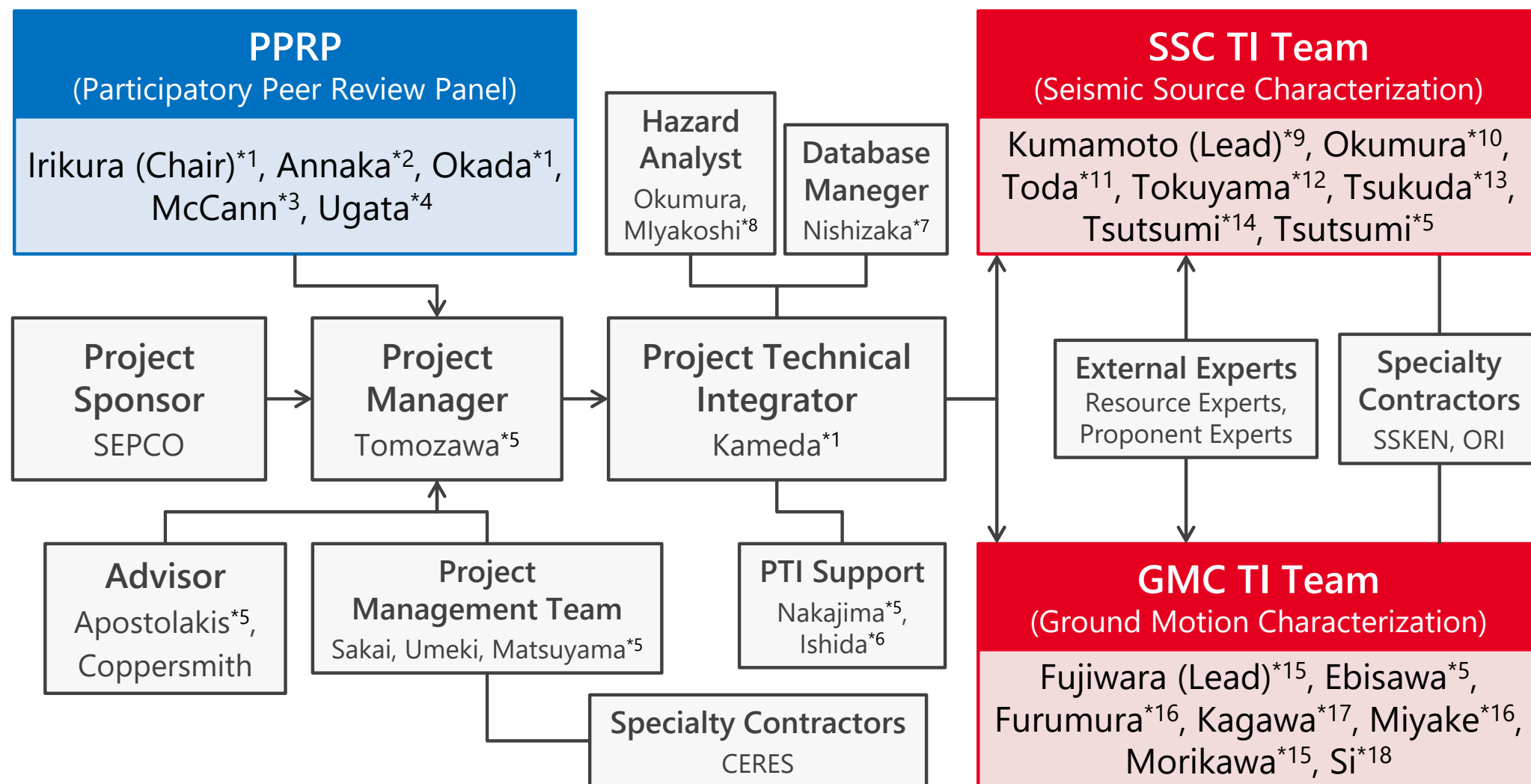
ハザード評価結果と今後の課題

- 四国電力では、福島第一原子力発電所事故の反省を踏まえ、地震などの低頻度事象を対象に「**確率論的リスク評価（PRA）**」を活用したりリスク評価の実施等、**安全性向上に向けた取り組みを推進**している。
- 2015年1月、原子力リスク研究センター（NRRC）の支援を得て、**現実に即したPRA（Good PRA）の構築**に向けた先駆的な活動として「**伊方3号プロジェクト**」を開始した。
- 同プロジェクトの技術的課題の一つである**確率論的地震ハザード解析（PSHA）の高度化**を図るため、原子力施設等におけるPSHAの評価の手順を定めた米国の**SSHACガイドラインのLevel 3**を適用したプロジェクト（以後「**伊方SSHACプロジェクト**」）を実施した。



# 伊方SSHACプロジェクトの体制

○伊方SSHACプロジェクトでは、SSHAC Level 3の規定に基づき、震源に関する特性を評価するチーム(SSC TI Team: 7名の専門家)、地震動評価に関する特性を評価するチーム(GMC TI Team: 7名の専門家)、SSCとGMCによる議論と評価の技術的妥当性がSSHAC Level 3のガイドラインに準じているかを確認するParticipatory Peer Review Panel (PPRP: 5名の専門家)を構成した。



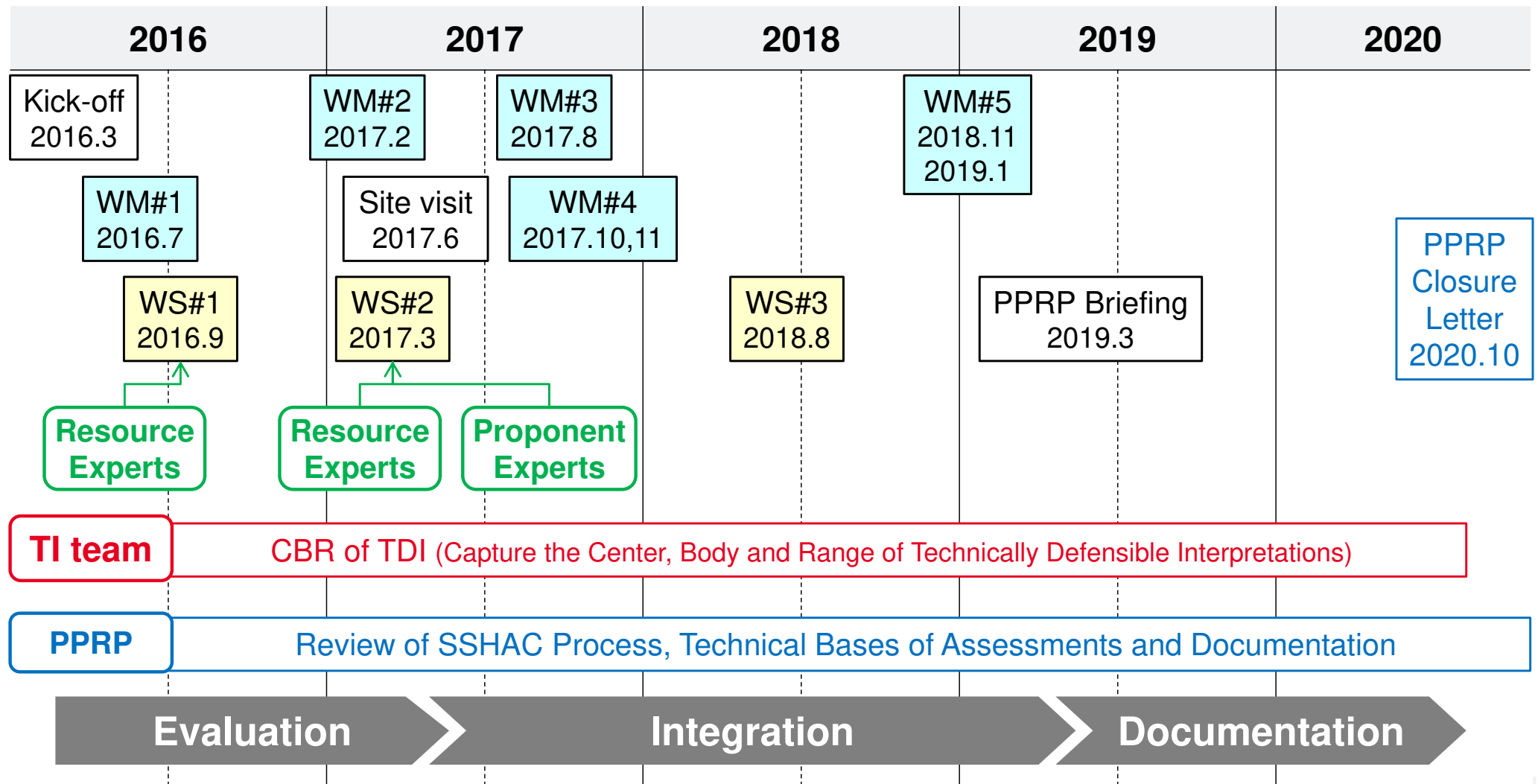
\*1Emeritus Kyoto Univ., \*2TEPSCO, \*3Stanford Univ., \*4TAISEI, \*5NRRC, \*6Kobori, \*7SEPCO, \*8ORI, \*9Okayama Univ., \*10Hiroshima Univ., \*11Tohoku Univ., \*12Tochi Univ., \*13AIIST, \*14Doshisha Univ., \*15NIED, \*16Univ. of Tokyo, \*17Tottori Univ., \*18SeismoRI & Univ. of Tokyo



# 伊方SSHACプロジェクトの検討の流れ

- 2016年に開催したKick-off Meeting以降, 3回の**Open Workshop**, SSCとGMCで各5回の**Working Meeting**, 1回の**PPRP Briefing**, 数十回以上の準備会(非公式会合)を実施した。
- 4年以上に亘る議論を経て**2020年10月のPPRP Closure Letter**発出によって**最終報告書が確定**し, その翌月(2020年11月)に四国電力ホームページで成果を公表した。

([https://www.yonden.co.jp/energy/atom/safety/sshac\\_project/index.html](https://www.yonden.co.jp/energy/atom/safety/sshac_project/index.html))



- WS#1におけるRE及びWS#2におけるREまたはPEの一覧を示す。TI teamも合わせると**総勢50名以上の国内外の専門家が伊方SSHACプロジェクトに参加した。**
- モデル構築にあたっては、REやPEから提供されたデータやモデルを含め、**約1,800件の国内外の関連文献等を収集・整理したデータベースが構築された。**

## RE (Resource Experts)

30名の専門家

### [SSC] 17名の専門家

青柳（電中研），壇（大崎総研），池田（四総研），神田（小堀研），松多（岡大），宮腰（大崎総研），宮下（産総研），七山（産総研），西坂（四電），野田（構研），小川（四電），大西（四電），大島（清水），汐見（防災科研），高橋（総合地質），辻（九大），柳田（阪神コンサル）

### [GMC] 13名の専門家

Abrahamson (UCB), 引田（鹿島），久田（工学院大），池浦（鹿島），岩城（防災科研），宮腰（大崎総研），三宅（東大），森川（防災科研），西坂（四電），小川（四電），佐藤（電中研），司（サイスマリサーチ・東大），鶴来（地盤研）

## PE (Proponent Experts)

18名の専門家

### [SSC] 12名の専門家

青木（東大），藤原（産総研），後藤（広大），早坂（広大），平井（日出町歴史資料館），宮川（産総研），西村（京大），野村（東工大），Stirling (Univ. of Otago), 高浜（構研），武村（名大），上田（電中研）

### [GMC] 6名の専門家

Abrahamson (UCB), 壇（大崎総研），福島，岩城（防災科研），加藤（小堀研），佐藤（電中研）

伊方発電所の概要

伊方発電所の基準地震動

SSHACガイドラインの概要

伊方SSHAC PJの経緯と体制

**モデル（ロジックツリー）の概要**

ハザード評価結果と今後の課題

○SSCモデルの概要（ロジックツリー）を以下に示す。

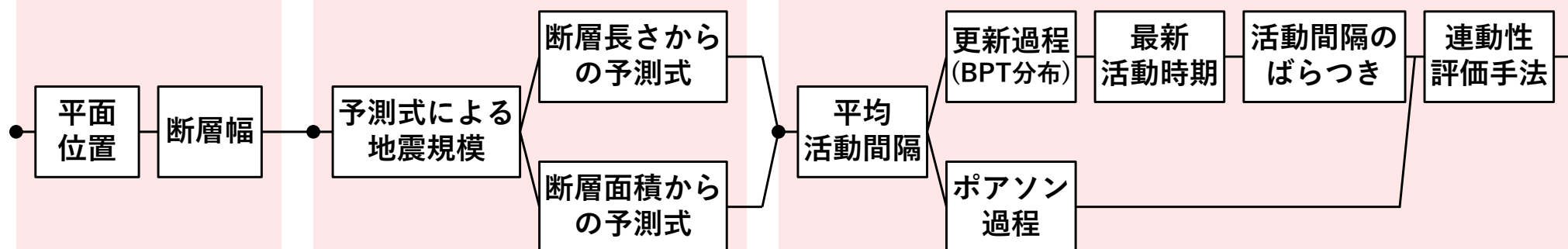
場所（位置・形状）

規模

発生確率

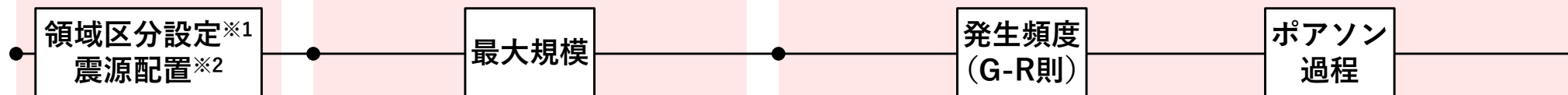
## 特定の震源断層面を設定する地震

（中央構造線断層帯の地震，その他内陸活断層の地震，南海トラフの大地震）



## 個別の震源断層面を設定しない地震

（陸側プレートの特定しにくい地震，フィリピン海プレートの特定しにくい地震，固有規模より小さい地震）



※1陸側プレートの特定しにくい地震およびフィリピン海プレートの特定しにくい地震の場合

※2固有規模より小さい地震の場合

○SSCモデルの概要（評価項目）を以下に示す。

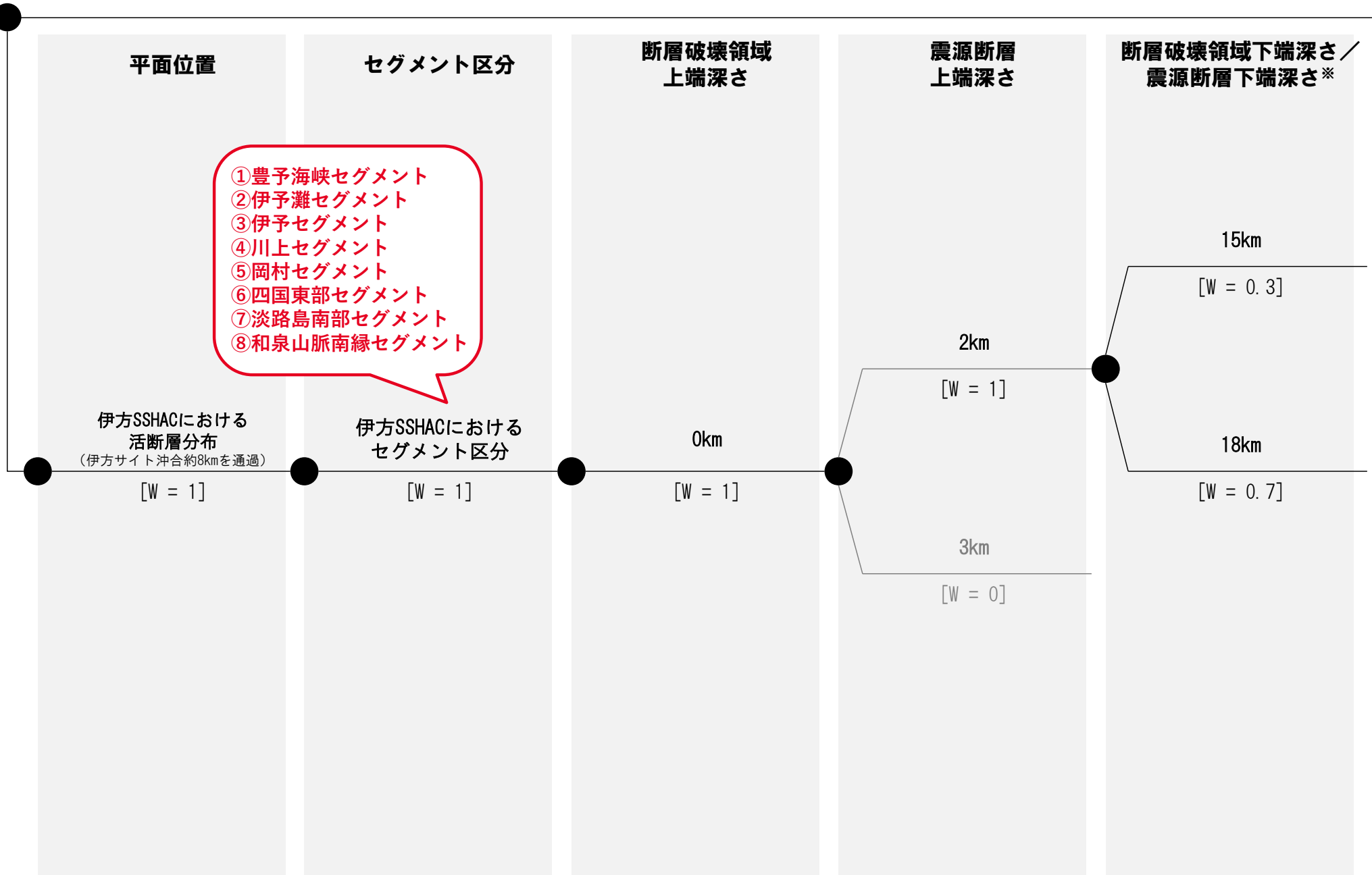
## Issue①

## Issue②

## Issue③

震源／評価項目	(a) 場所（位置・形状）	(b) 規模	(c) 発生確率
(1) 南海トラフの大地震	想定震源域，断層面の 上端／下端	地震規模の算定，地震 規模予測式	平均活動間隔，最新活動時期，活 動間隔のばらつき，地震の時系列 モデル，連動性評価手法
(2) フィリピン海プレートの 特定しにくい地震	領域区分の設定，プレー ト形状，プレート間とプ レート内の地震の比率， 断層面（位置・形状）	プレート内／プレート 間地震の最大規模	地震カタログ，G-R則算定，地震 の時系列モデル
(3) 中央構造線断層帯の地震	平面位置，セグメント区 分，断層破壊領域及び震 源断層の上端／下端深さ， 断層傾斜角	連動時の規模評価手法， 地震規模算定に用いる パラメータ（断層長／ 断層面積），地震規模 予測式	平均活動間隔の評価手法，最新活 動時期，活動間隔のばらつき，平 均変位速度，1回当たりの変位量， 地震の時系列モデル，連動性評価 手法
(4) その他内陸活断層の地震	対象とする活断層，活断 層の存否，断層破壊領域 及び震源断層の上端／下 端深さ	地震規模の設定，地震 規模予測式（断層面積 の設定），傾斜角	平均活動間隔，平均活断層間隔の 算定方法，最新活動時期，活動間 隔のばらつき，地震の時系列モデ ル
(5) 内陸活断層の 固有規模より小さい地震	断層面（位置・形状）	最大規模	発生頻度，地震の時系列モデル
(6) 陸側プレートの 特定しにくい地震	領域区分の設定，地震発 生層の上端／下端， 断層面（位置・形状）	最大規模	地震カタログ，G-R則算定，地震 の時系列モデル

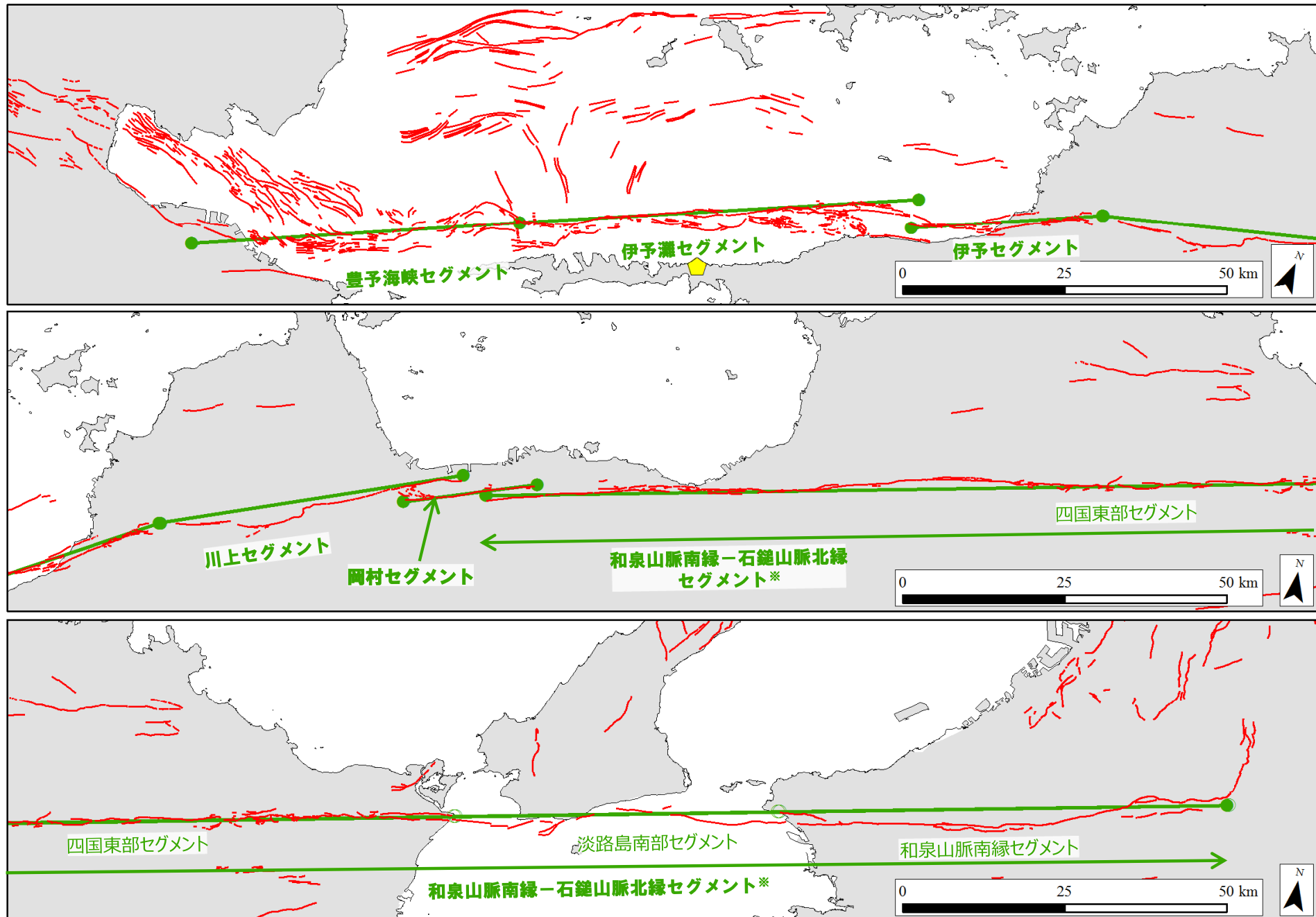
# 中央構造線断層帯の位置・形状のロジックツリー(1/2)

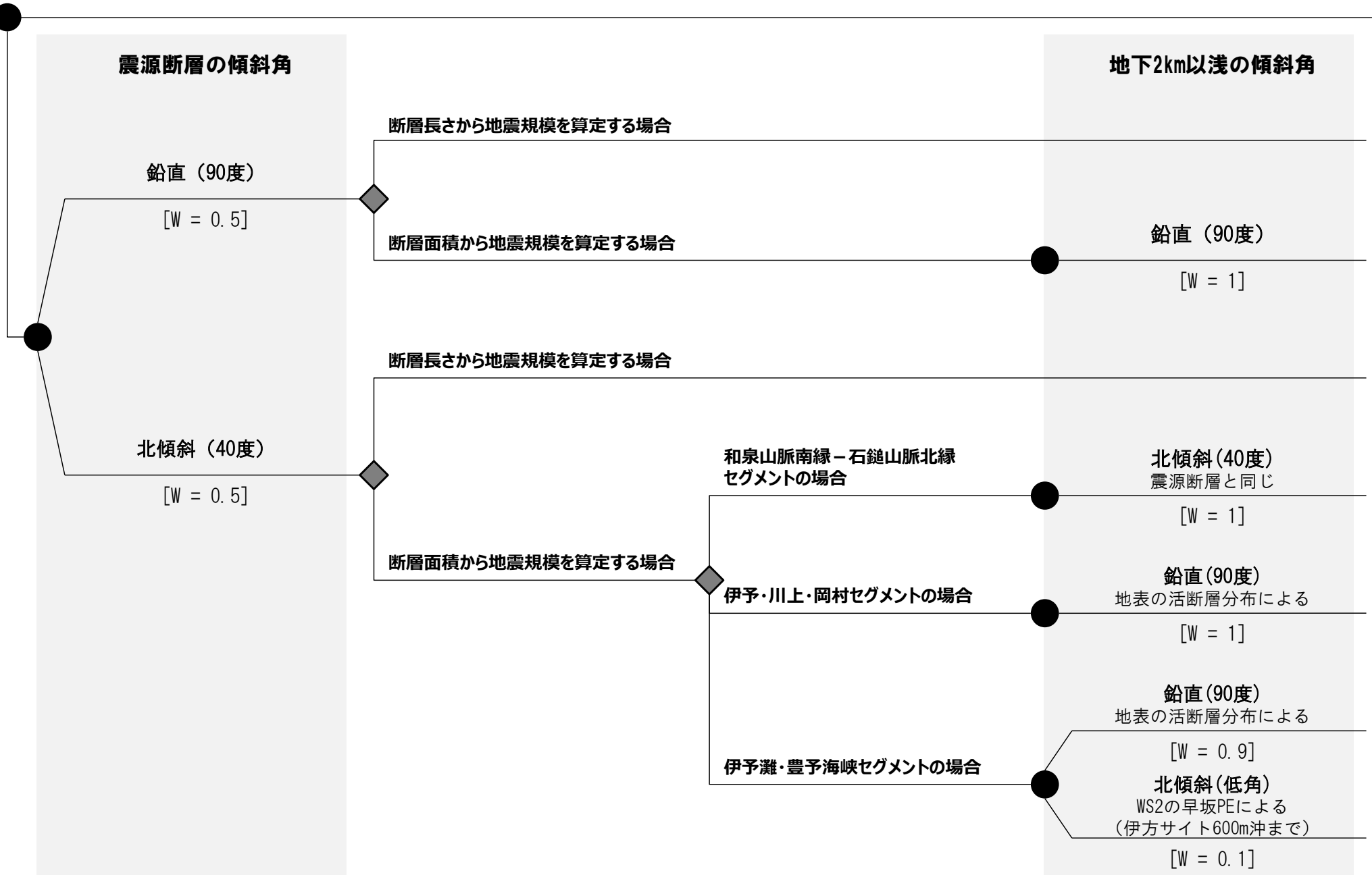


※断層長さから地震規模を算定して断層モデルによる地震動評価を行う場合、平均すべり量が10mを超えるケースがあることから、当該ケースについては、断層幅を広げて(震源断層下端の値を深く設定)、平均すべり量が10mを超えないようなモデル化を行う。

# セグメント区分<鉛直ケース>

○深部の傾斜角が鉛直の場合のセグメント区分を以下に示す。

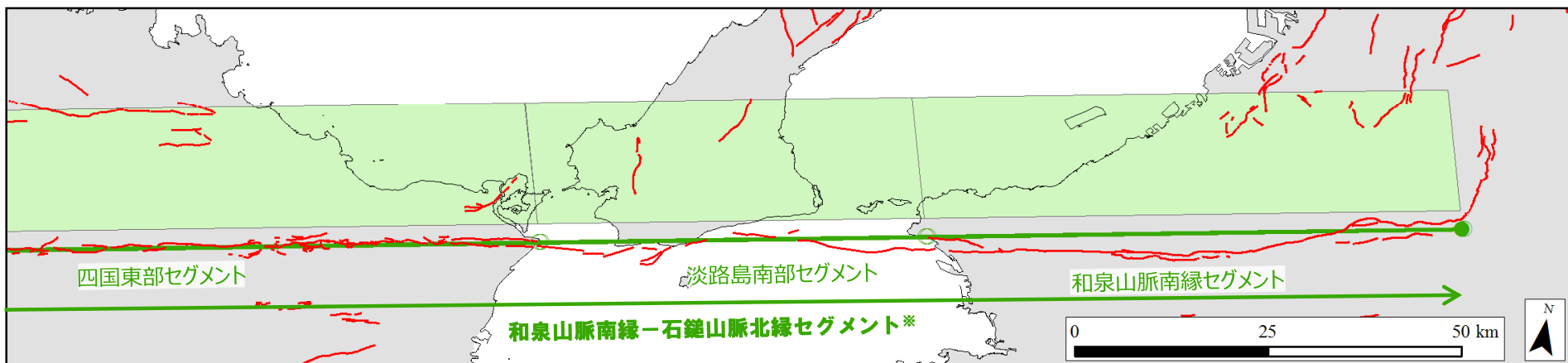
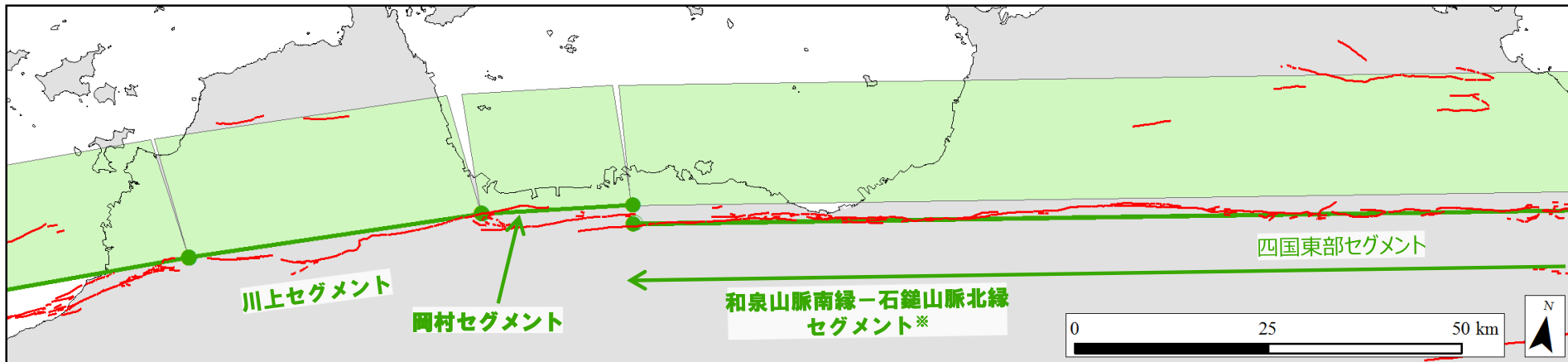
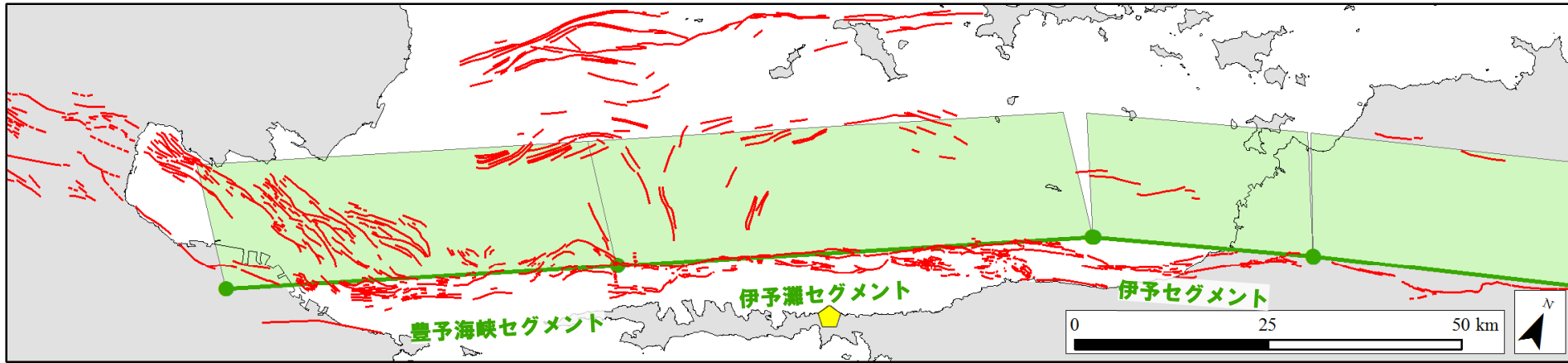


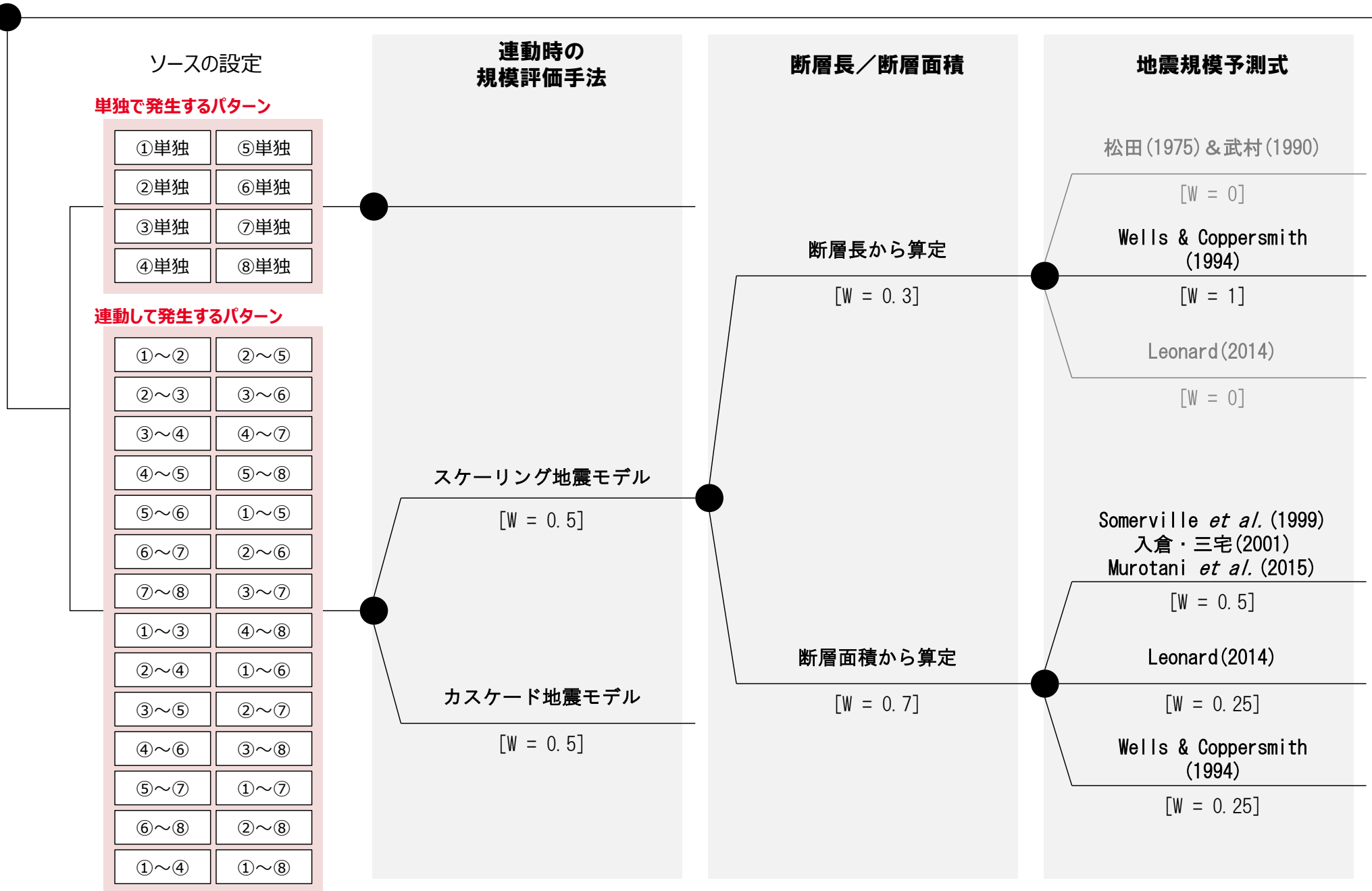




# セグメント区分<北傾斜ケース>

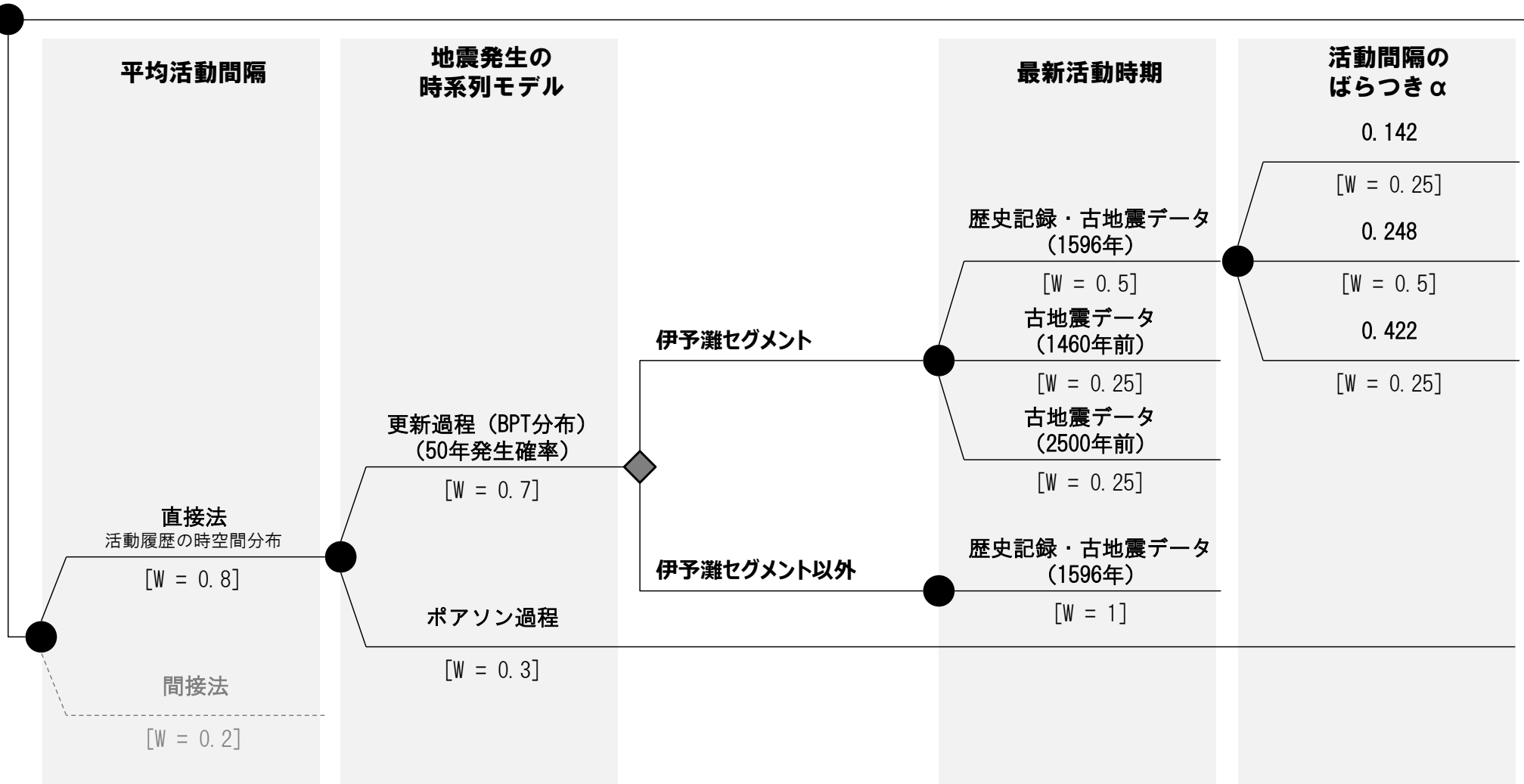
○深部の傾斜角が北傾斜の場合のセグメント区分を以下に示す。





①～⑧は各セグメント

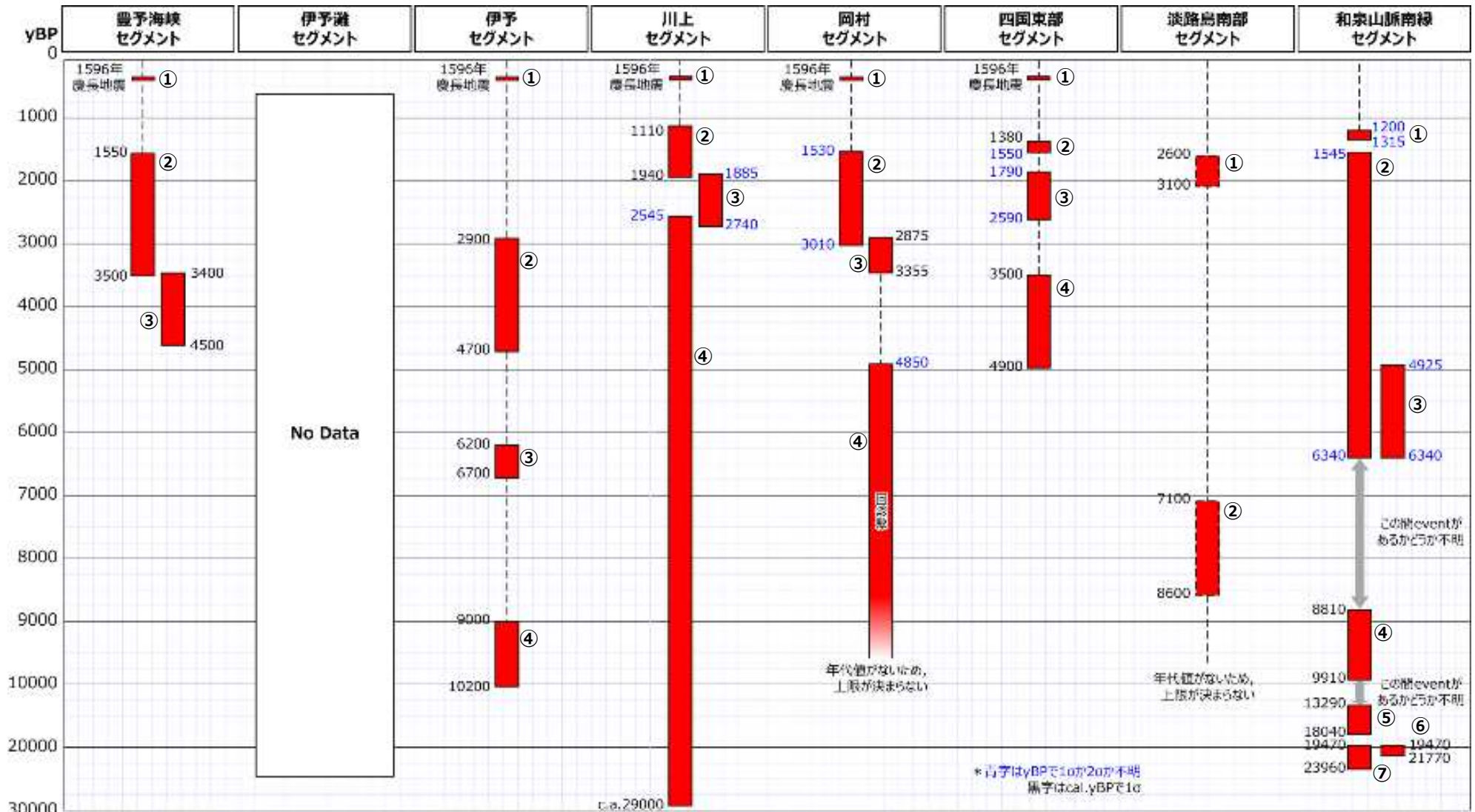
# 中央構造線断層帯の発生確率のロジックツリー(1/3)



セグメント名		豊予海峡	伊予灘	伊予	川上	岡村	四国東部	淡路島南部	和泉山脈南縁
直接法	平均活動間隔 (年)	1760	3060	3060	950	1500	1260	5000	3400
	平均活動間隔 (年)	1170	1000	1000	1000	1090	870	1480	1480
間接法	変位速度 (mm/yr)	3	2.5	2.5	2.5	5.5	7.5	2.7	2.7
	1回当たりの変位量 (m)	3.5	2.5	2.5	2.5	6.0	6.5	4.0	4.0

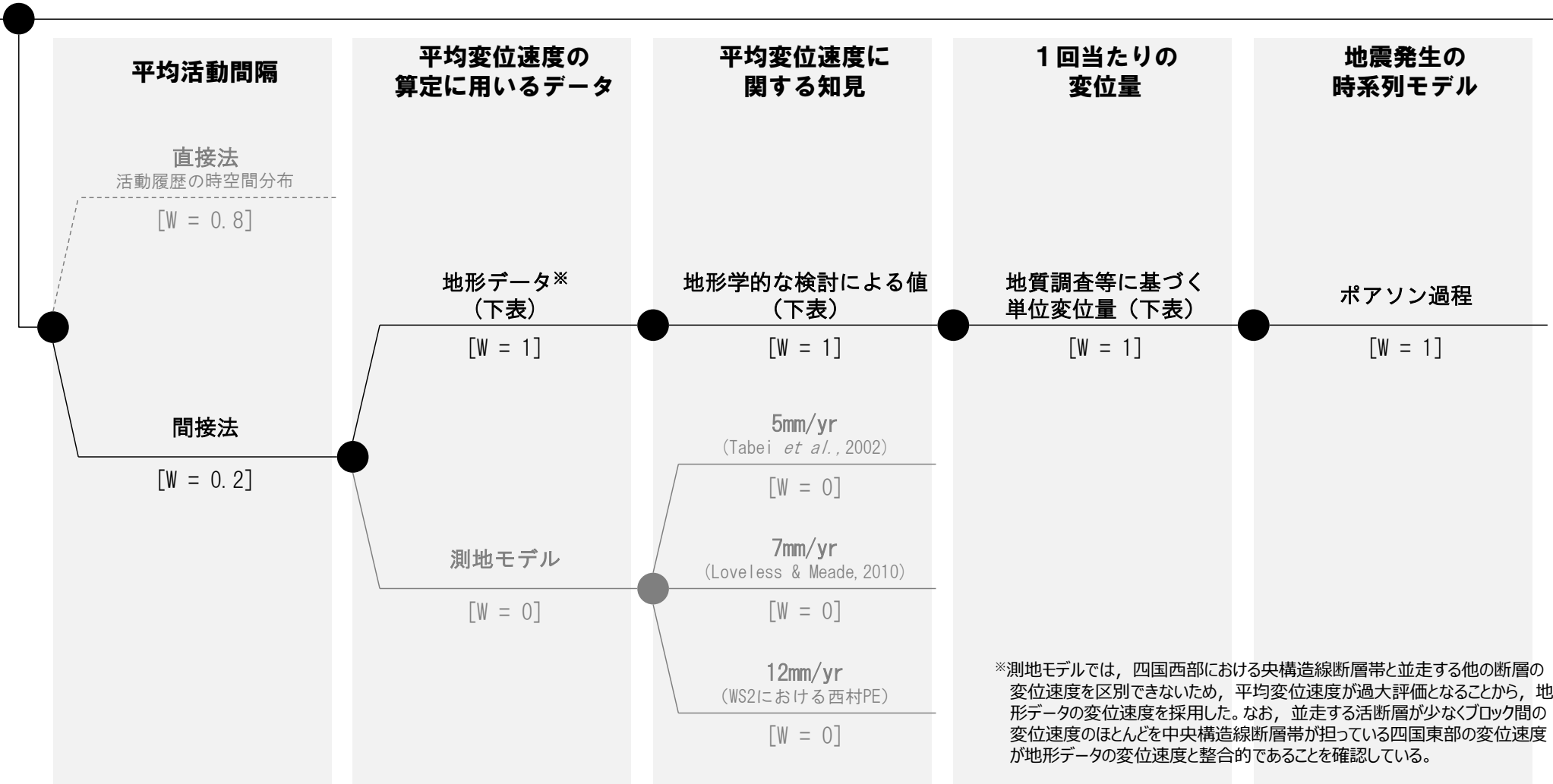
# 中央構造線断層帯の活動履歴

○伊方SSHACプロジェクトにおけるセグメント区分ごとの活動履歴を以下に示す。



## 【補足】

- ・和泉山脈南縁セグメントのイベント③と④の間（6340年前以前～8810年前以降）および④と⑤の間（9910年前以前～13290年前以降）は地質データがなく、イベント発生の有無が不明である。
- ・川上セグメントのイベント④は年代の幅が広すぎるため、活動履歴の評価には用いない。
- ・岡村セグメントのイベント④は年代および回数が不明瞭であり、活動履歴の評価には用いない（3355年前以前～4850年前以降に活動がなかったことは評価に用いる）。
- ・各セグメントの活動履歴の番号はイベントが発生した順番を表す。各イベントは地層の切断等から判断しており、逆転はしない。



セグメント名		豊予海峡	伊予灘	伊予	川上	岡村	四国東部	淡路島南部	和泉山脈南縁
直接法	平均活動間隔 (年)	1760	3060	3060	950	1500	1260	5000	3400
	平均活動間隔 (年)	1170	1000	1000	1000	1090	870	1480	1480
間接法	変位速度 (mm/yr)	3	2.5	2.5	2.5	5.5	7.5	2.7	2.7
	1回当たりの変位量 (m)	3.5	2.5	2.5	2.5	6.0	6.5	4.0	4.0

## 連動性評価手法

地震発生のパターンを地震発生確率の分配で評価するモデル

[W = 0.5]

地震発生のパターンを連動破壊の可能性で評価するモデル

[W = 0.5]

## 連動性評価手法の例

■2つの震源(A・B)の地震発生確率がそれぞれ12%、14%の場合

### 地震発生のパターンを地震発生確率の分配で評価するモデル

No.	A	B	地震発生確率
1	Aのみ		6%
		Bのみ	8%
	AB連動		6%

⇒このモデルでは、1本のハザードカーブの中で3つの地震(A単独、B単独、AB連動)を想定する。

・3つの地震の地震発生確率は、地震本部(2016)における考え方に従い、震源A・Bの地震発生確率を分配して算定する。

### 地震発生のパターンを連動破壊の可能性で評価するモデル

No.	A	B	地震発生確率※1
1	Aのみ		約6%
2		Bのみ	約7%
3	Aのみ	Bのみ	約13%
4	AB連動(A⇒B)		約6%
5	AB連動(B⇒A)		約7%

⇒このモデルでは、各地震発生のパターンのハザードを想定し、重み付き平均値を全体のハザードカーブとして算定する。

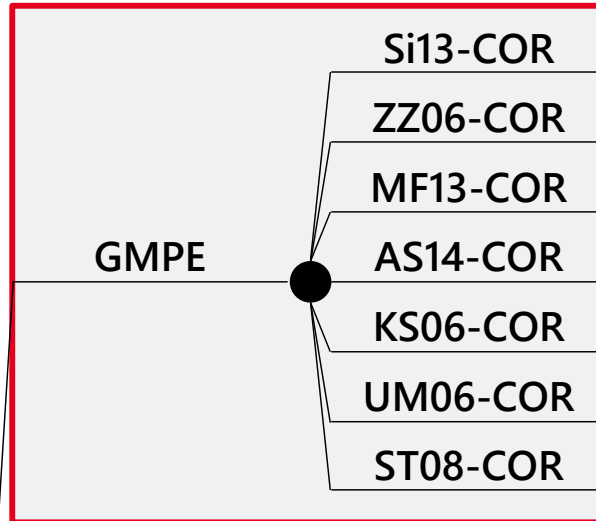
・連動して発生する地震の発生確率を、破壊が開始する断層の発生確率と隣接する断層へ破壊が進展する確率(連動する確率)を等分として算定する\*。

※連動する確率と連動しない確率は0.5 : 0.5とする。No.1の場合、Aで地震が発生する確率(12%)とBが連動しない確率(0.5)はよりA単独の地震発生確率は約6%となる。

○GMCモデルの概要（ロジックツリー）を以下に示す。

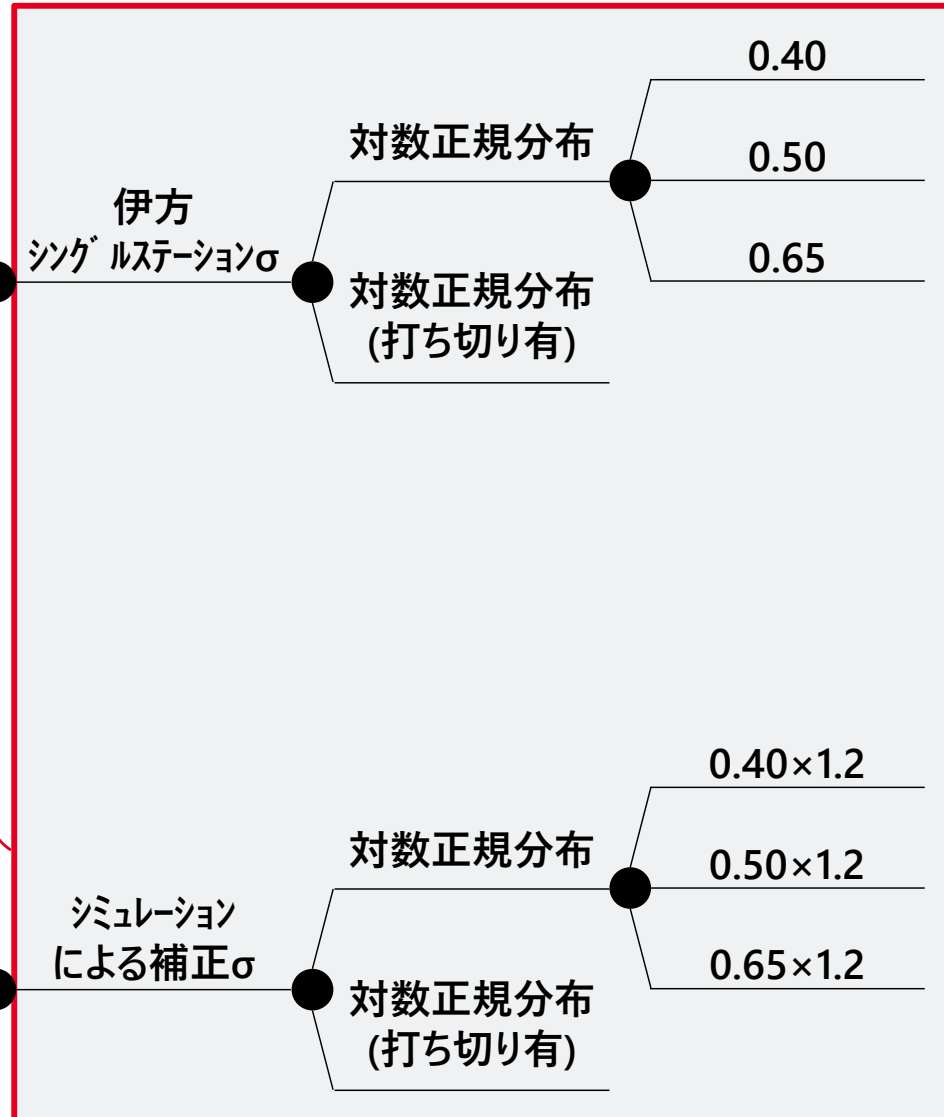
## Issue①

GMPEの補正  
複数のGMPEの採用



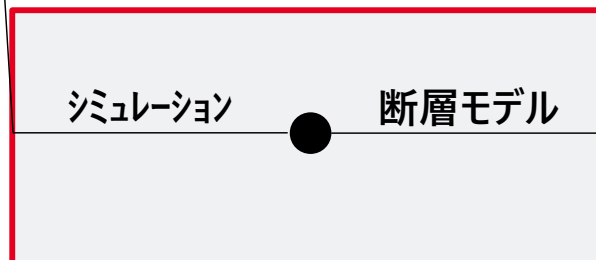
## Issue③

震源近傍の地震動のばらつきの設定  
確率分布形状の設定



## Issue②

サイト近傍の震源への  
シミュレーションの導入



# GMCモデルの概要(2/2)

○GMCモデルの概要（評価項目）を以下に示す。

震源／評価項目	地震動評価			
	GMPE	断層モデル	共通	
(1) 南海トラフの大地震	①硬岩サイトにおけるGMPEの補正	・ 広域な断層への適用性	—	③地震動のばらつきと確率分布形状
(2) フィリピン海プレートの特定しにくい地震		・ GMPEにおける震源深さの設定	—	
(3) 中央構造線断層帯の地震		・ 近傍への適用性	②SCEC BBPとの比較・検証 (近傍の震源への適用)	
(4) その他内陸活断層の地震		・ 近傍への適用性		
(5) 内陸活断層の固有規模より小さい地震		・ 一回り小さい地震の考慮	—	
(6) 陸側プレートの特定しにくい地震		・ GMPEにおける震源深さの設定	—	

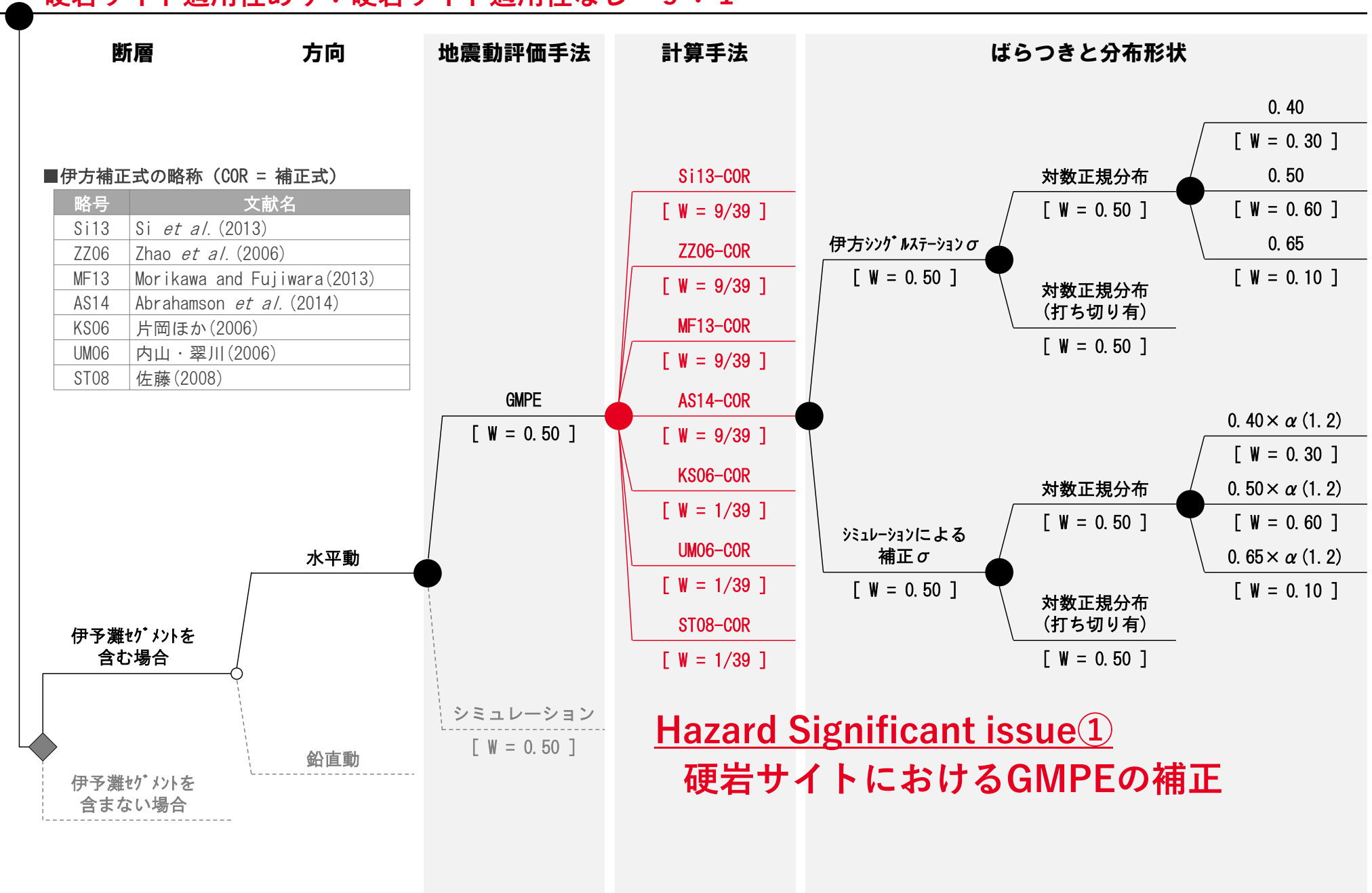
## ハザード重要事項(Hazard Significant Issues)

SCEC BBP : Southern California Earthquake Center Broadband Platform  
 南カリフォルニア地震センターによる広帯域地震動予測に関するプロジェクト



# GMPEに関するロジックツリー

硬岩サイト適用性あり：硬岩サイト適用性なし = 9 : 1



**Hazard Significant issue①**  
**硬岩サイトにおけるGMPEの補正**

# 硬岩サイトにおけるGMPEの補正の概要

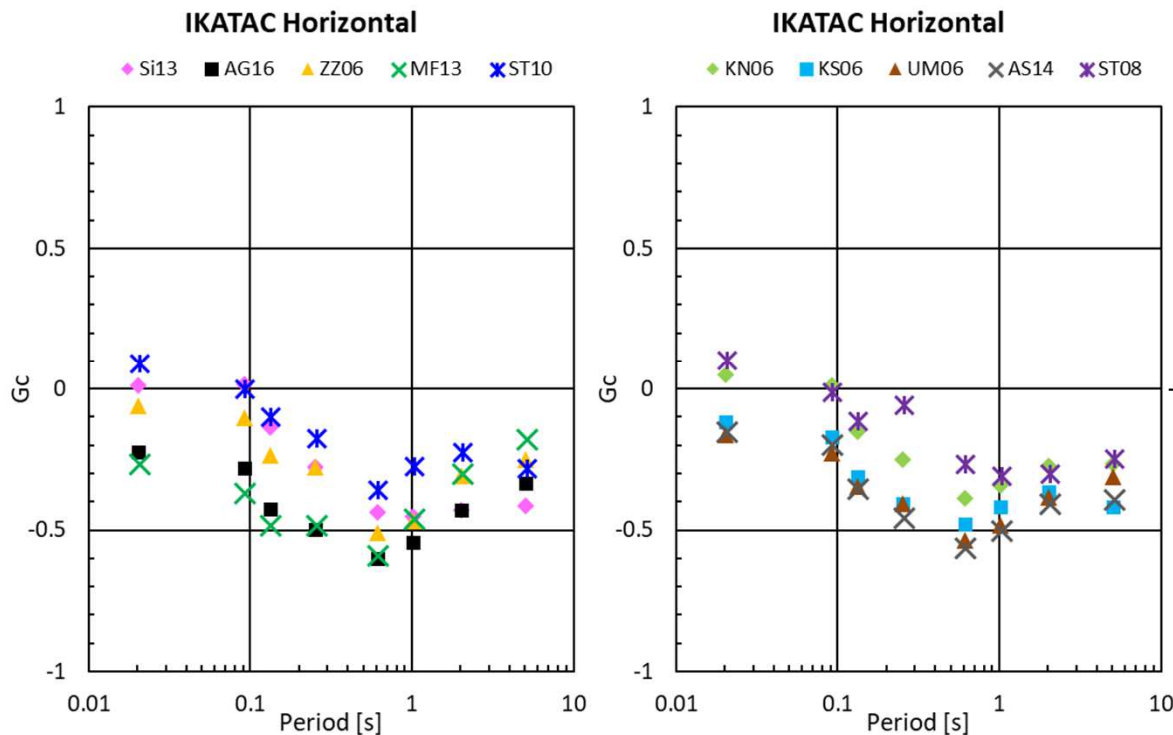
- 中央値の不確実性を考慮する観点から、本来は伊方サイトのような硬岩には適用性のないものを含めた複数のGMPE (Ground Motion Prediction Equation) が採用され、サイト等の観測記録を用いたサイト補正が行われた。
- 補正係数は0より小さくなる傾向で硬岩サイトの特徴を一定程度反映できたが、硬岩サイトに適用性のない幾つかのGMPEは顕著に大きな地震動レベルとなった。

GMPE	Ground condition
Kanno et al. (2006)	$100 \leq V_{s30} \leq 1400$ m/s
Kataoka et al. (2006)	about $V_{s30} = 700$ m/s
Uchiyama and Midorikawa (2006)	$150 \leq V_{s30} \leq 750$ m/s
Sato (2008)	about $V_{s30} = 700$ m/s
Si et al. (2013)	$V_{s30} \geq 2000$ m/s
Abrahamson et al. (2016)	$90 \leq V_{s30} \leq 2000$ m/s
Zhao et al. (2006)	$V_{s30} = 2000$ m/s
Morikawa and Fujiwara (2013)	$100 \leq V_{s30} \leq 2000$ m/s
Sato (2010)	$400 \leq V_{s30} \leq 3000$ m/s
Abrahamson et al. (2014)	$100 \leq V_{s30} \leq 2000$ m/s

硬岩サイト  
適用性なし

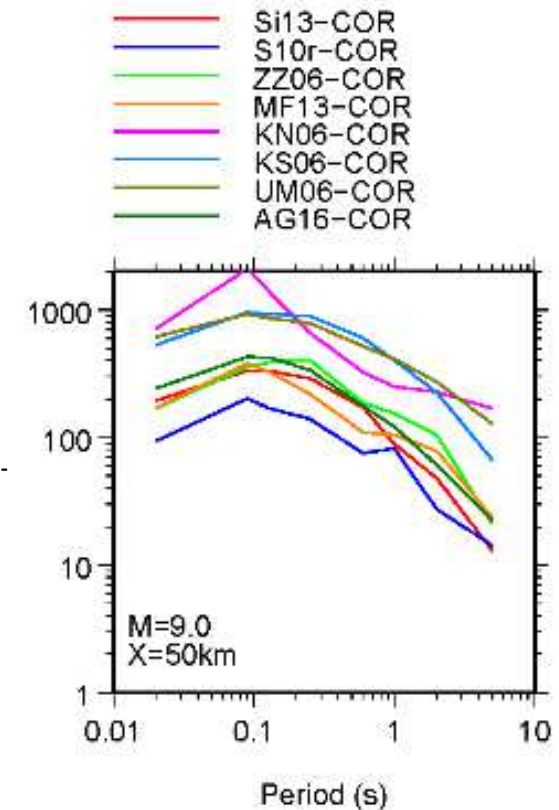
硬岩サイト  
適用性あり

## ■ サイト補正係数

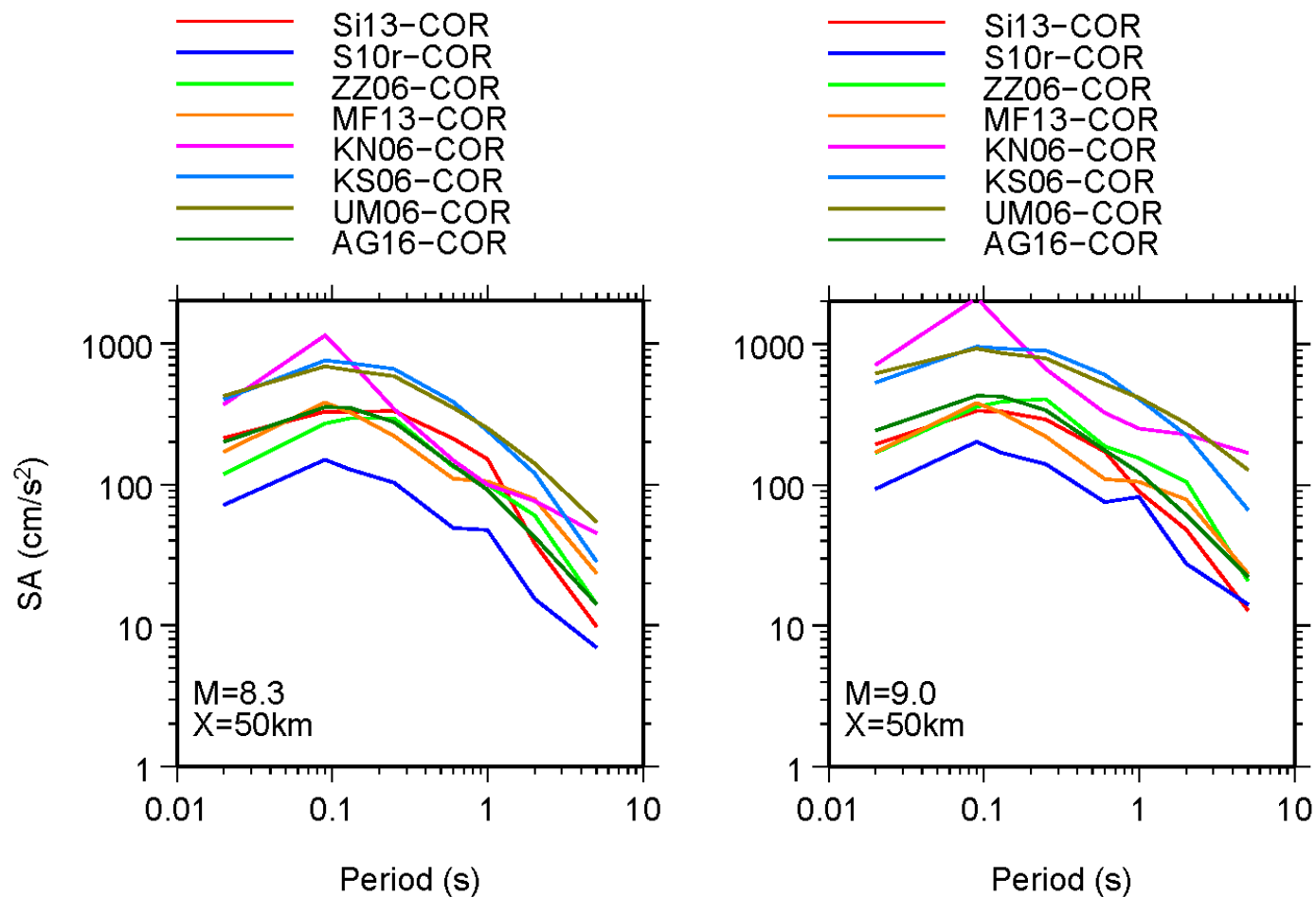


補正により  
予測値より  
大きくなる  
振幅大

補正により  
予測値より  
小さくなる  
振幅小



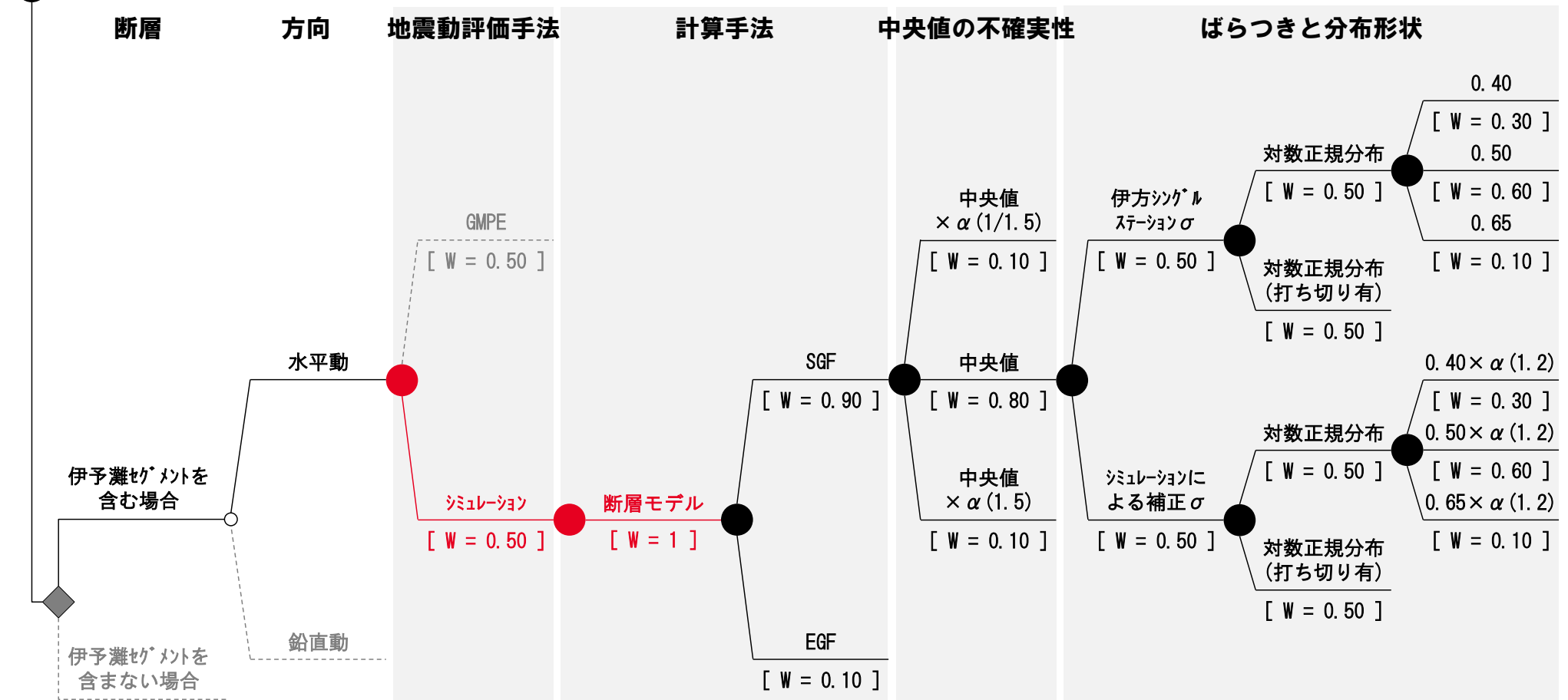
- 中央値の不確実性を考慮する観点から、本来は伊方発電所のような硬岩には適用性のないものを含めて複数のGMPEが採用された結果として、一部のGMPEではサイト係数を補正しても地震動レベルが顕著に大きく評価されている。
- NGA-West2のGMPEでは同一の地震動データベースに基づく検討がなされて中央値の不確実性がより狭い範囲におさまっていることを踏まえれば、地震ハザード評価の更なる高度化に向けた今後の課題として、国内でも複数のチームが同一のデータベースに基づきGMPEを構築していくことが期待される。



symbol	documents
Si13	Si <i>et al.</i> (2013)
S10r	Sato (2010)
ZZ06	Zhao <i>et al.</i> (2006)
MF13	Morikawa and Fujiwara(2013)
KN06	Kanno <i>et al.</i> (2006)
KS06	Kataoka <i>et al.</i> (2006)
UM06	Uchiyama and Midorikawa (2006)
AG16	Abrahamson <i>et al.</i> (2016)

# 断層モデルに関するロジックツリー

GMPE : シミュレーション = 1 : 1



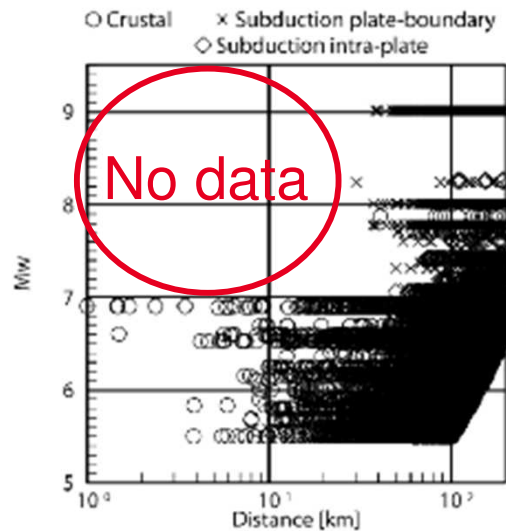
## Hazard Significant issue②

SCEC BBPとの比較・検証 (近傍の震源への適用)

# 断層モデルによる評価の概要

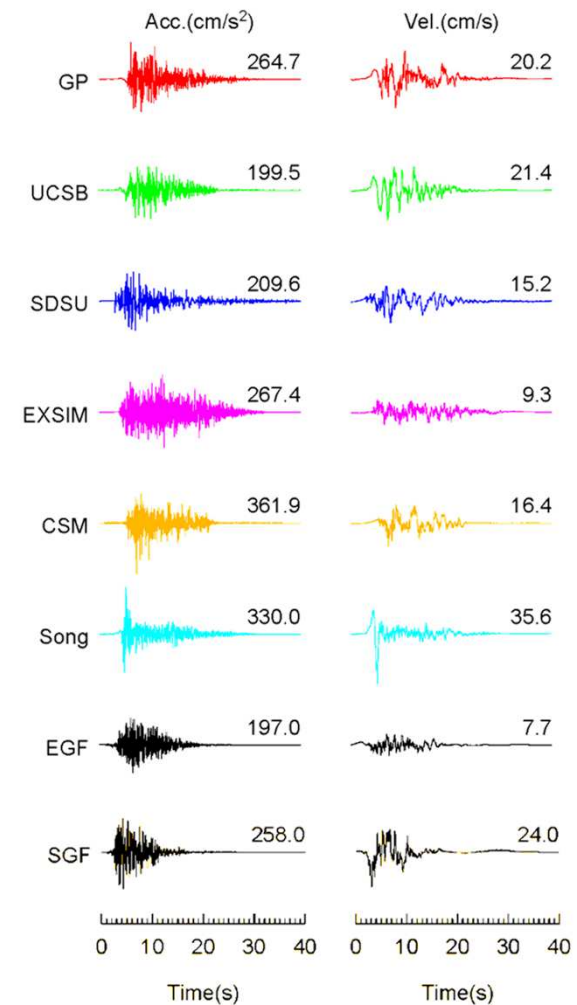
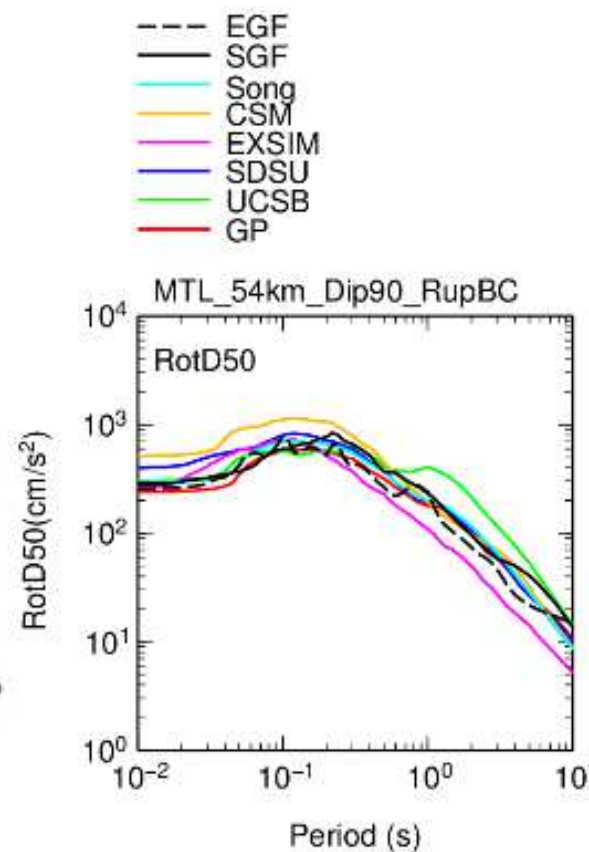
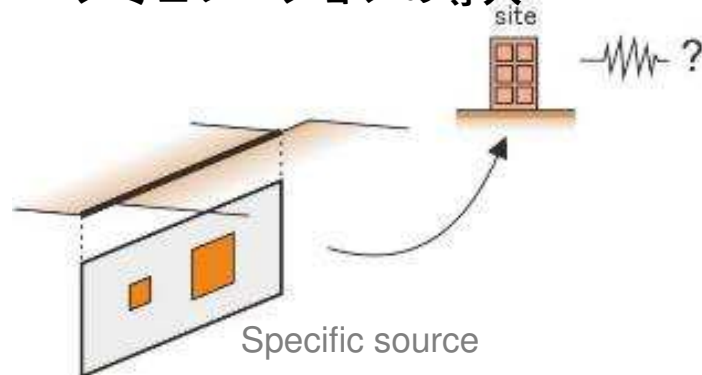
- 伊方発電所から約8kmと近接する中央構造線断層帯を評価するにあたって、GMPEは近傍の震源への適用には課題が残ることから、**断層モデルを用いたシミュレーションによる地震動評価が導入**された。
- 断層モデルを用いたシミュレーションについては、国内での採用実績が豊富な**特性化震源モデル（レシピ）**が採用された。
- 採用にあたっては、海外で用いられている**SCEC Broadband Platformの断層モデルによる評価結果と概ね整合**することが確認された。

## ■ GMPEの構築に用いられたデータ ■ 中央構造線断層帯を対象とした断層モデルによる評価(SCECとの比較)



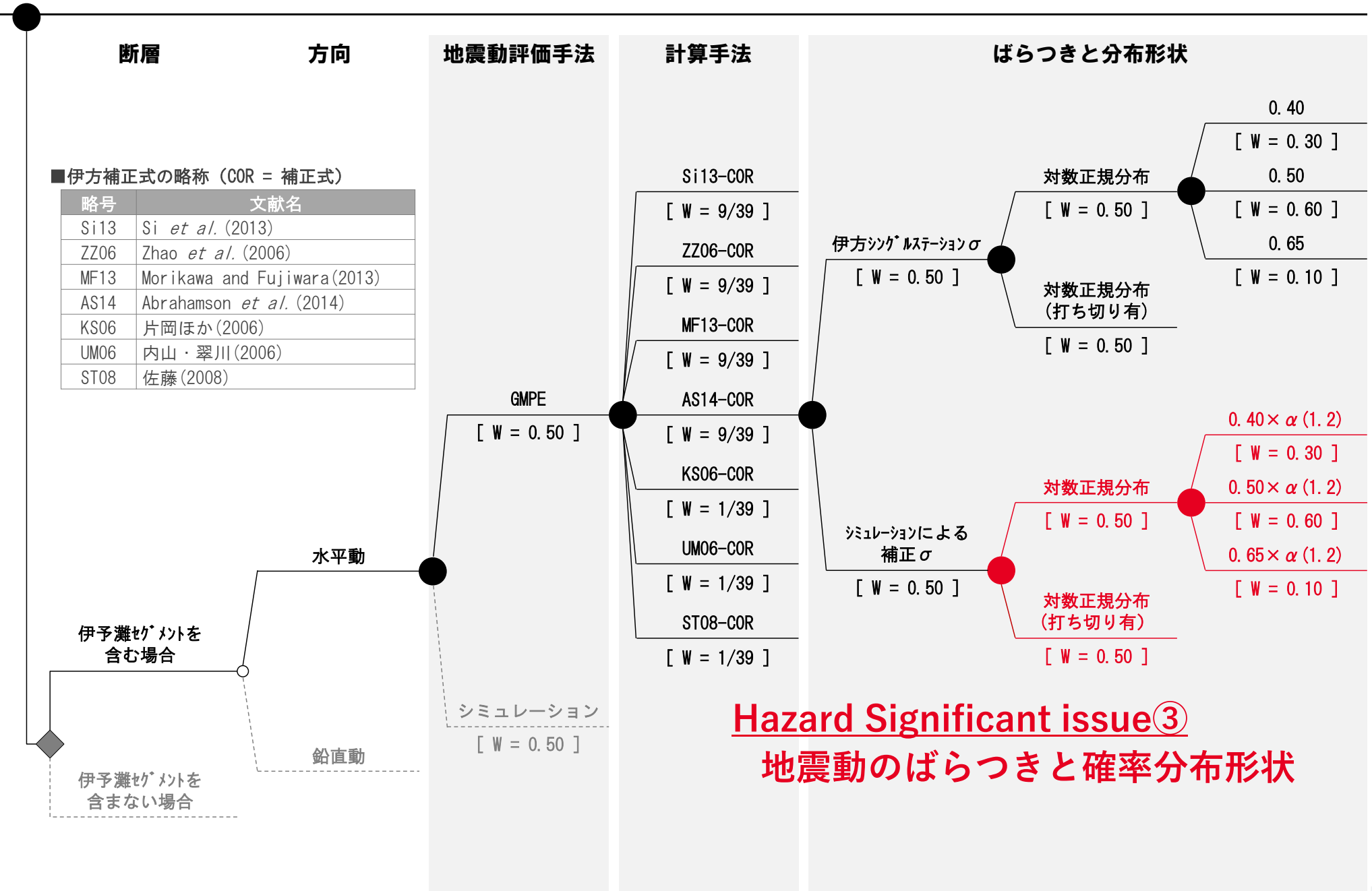
Morikawa and Fujiwara(2016)

シミュレーションの導入



# ばらつきと分布形状に関するロジックツリー

○断層近傍の補正σおよび対数正規分布の打ち切りを分岐として設定

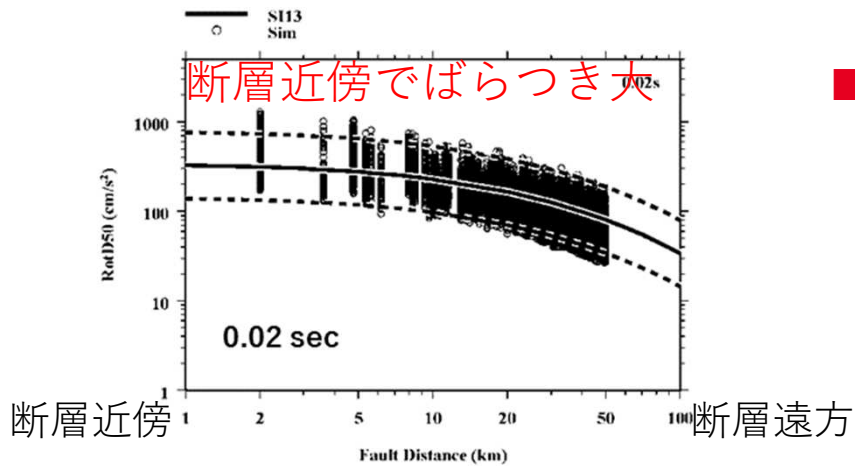


## Hazard Significant issue③

## 地震動のばらつきと確率分布形状

# 地震動のばらつきと確率分布形状

- 既往文献に基づき、シングルステーション $\sigma$ として、0.40, 0.50, 0.65の分岐が設定された。
- さらに、断層近傍の地点は地震動のばらつきが大きくなる傾向を考慮し、シングルステーション $\sigma$ の値を補正する分岐が設定された。
- 確率分布形状については、南海トラフの大地震のような発生頻度が高い震源は、地震ハザードの低頻度側においてばらつきが大きくなるに伴い非現実的に大きな地震動が評価されるが、物理現象として地震動は有限であることから、ばらつきの分布形状として**対数正規分布の裾野を打ち切る分岐**が設定された。

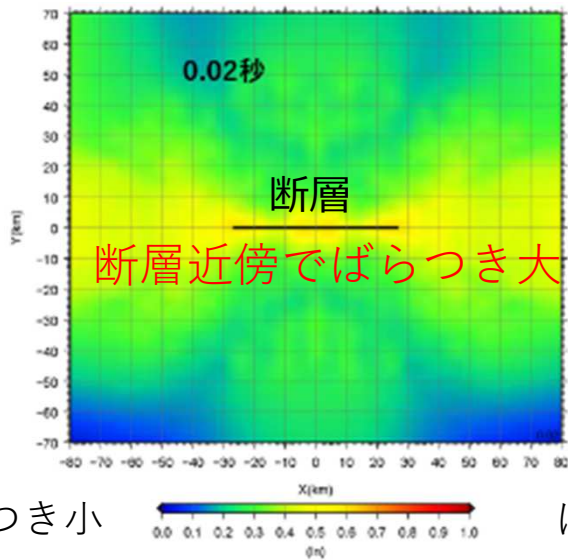


断層近傍 断層遠方

## ■観測値と予測値の残差の分布形状 (Si et al., 2019)

Table 1: Statistic parameters estimated for the data categories with different magnitude

Group	Data Size	Mean	Std Dev	Skewness	Kurtosis
A (5<M<6)	357	-0.49	0.67	-0.337	0.358
B (6<M<7)	485	-0.247	0.0329	-0.456	1.055
C (M>=7)	177	0.0725	0.563	-1.076	0.904



ばらつき小 ばらつき大

地震規模 小 → 大  
対数正規分布 頭打ちの傾向

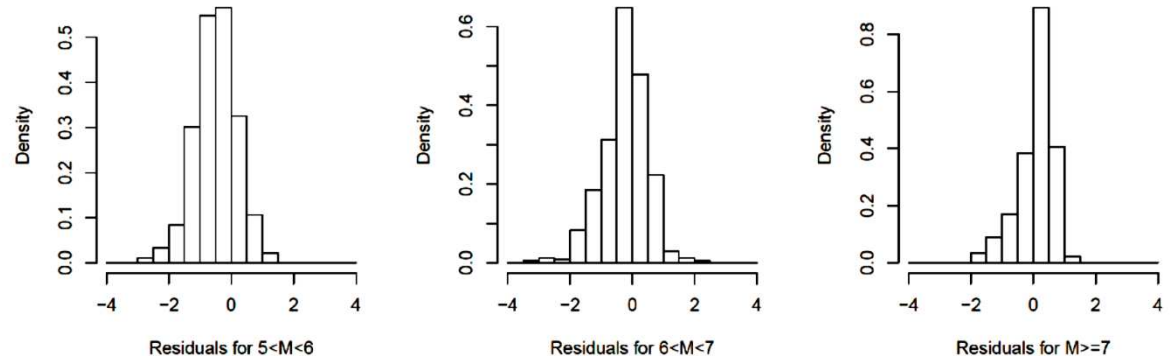


Figure 2. Histogram of the residuals for the three data categories (left: A; middle: B; right: C)

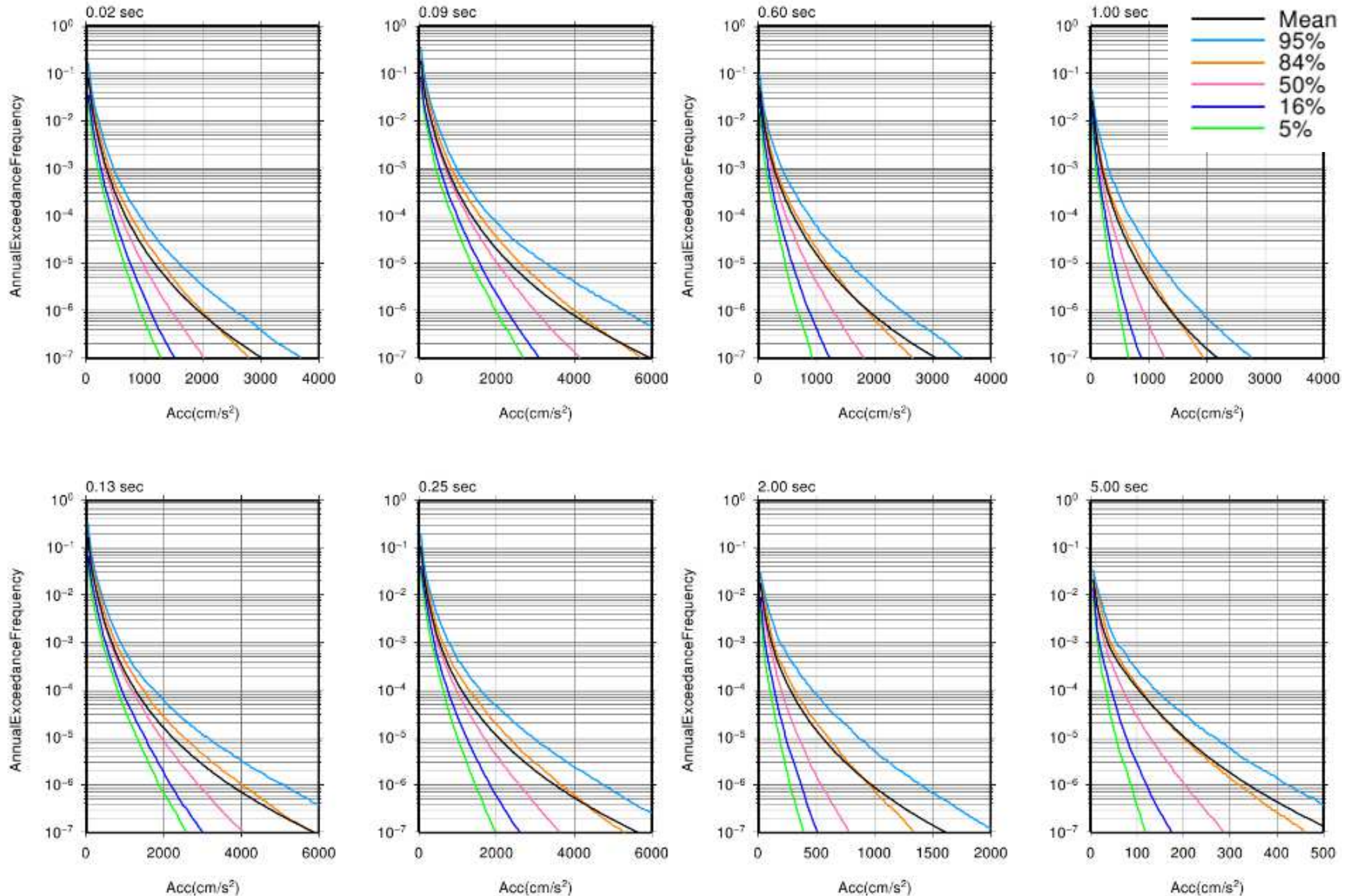
# 考慮した不確かさの比較

	不確かさ	新規制基準	伊方SSHAC
S S C	断層全長（破壊パターン）	480km （単独3パターン） 480, 130, 54km	416km （単独 8パターン） （連動 28パターン）
	震源断層の傾斜角	90° , 30° N	90° , 40° N
	地下2km以浅の傾斜角	モデル化せず	鉛直, 北傾斜
	断層下端深さ	15km	15, 18km
	アスペリティの深さ	断層上端	断層上端／下端
	地震規模予測式	断層長さの式×1 断層面積の式×2	断層長さの式×1（3種類検討） 断層面積の式×3
	連動時の地震規模評価	スケーリング	スケーリング, カスケード
発生確率	設定なし（地震が起こるものとして想定）	歴史記録や古地震データ, 変位速度から	
G M C	地震動評価手法	GMPE, 断層モデル	GMPE, 断層モデル
	GMPEの種類	基本的に耐専スペクトル	7種類
	断層モデルの種類	EGF	SGF, EGF
	断層モデルの中央値の不確かさ	考慮せず	考慮 （×1.5, ×1, ×1/1.5）
	地震動のばらつき	応力降下量1.5倍	考慮（対数正規分布）



伊方発電所の概要  
伊方発電所の基準地震動  
SSHACガイドラインの概要  
伊方SSHAC PJの経緯と体制  
モデル（ロジックツリー）の概要  
**ハザード評価結果と今後の課題**

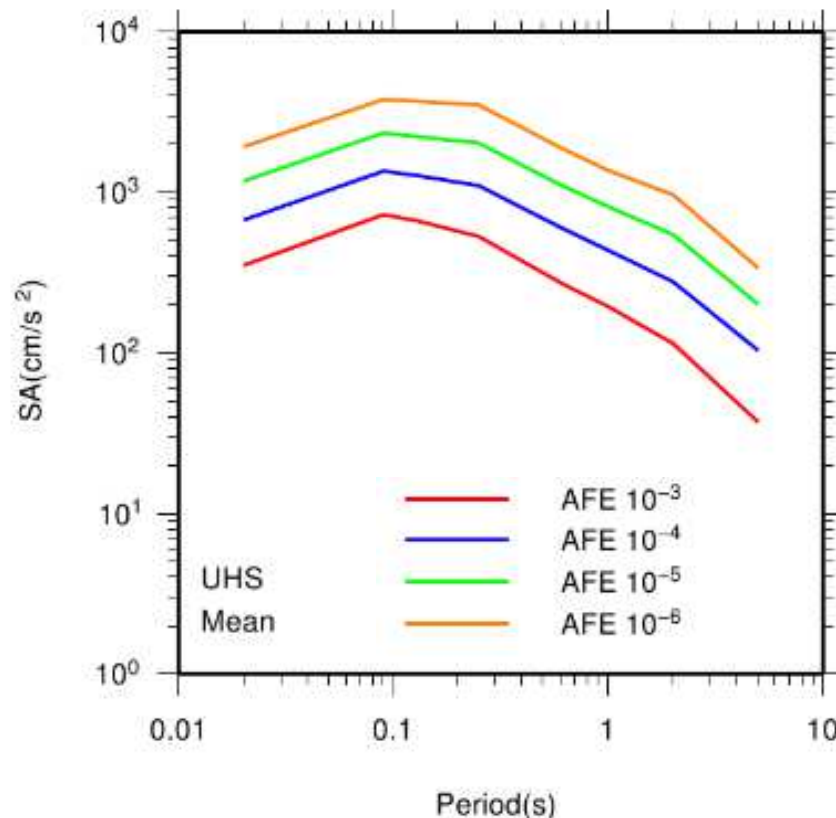
# 地震ハザード評価結果(1/4)フラクタイルハザード(全震源・全周期)



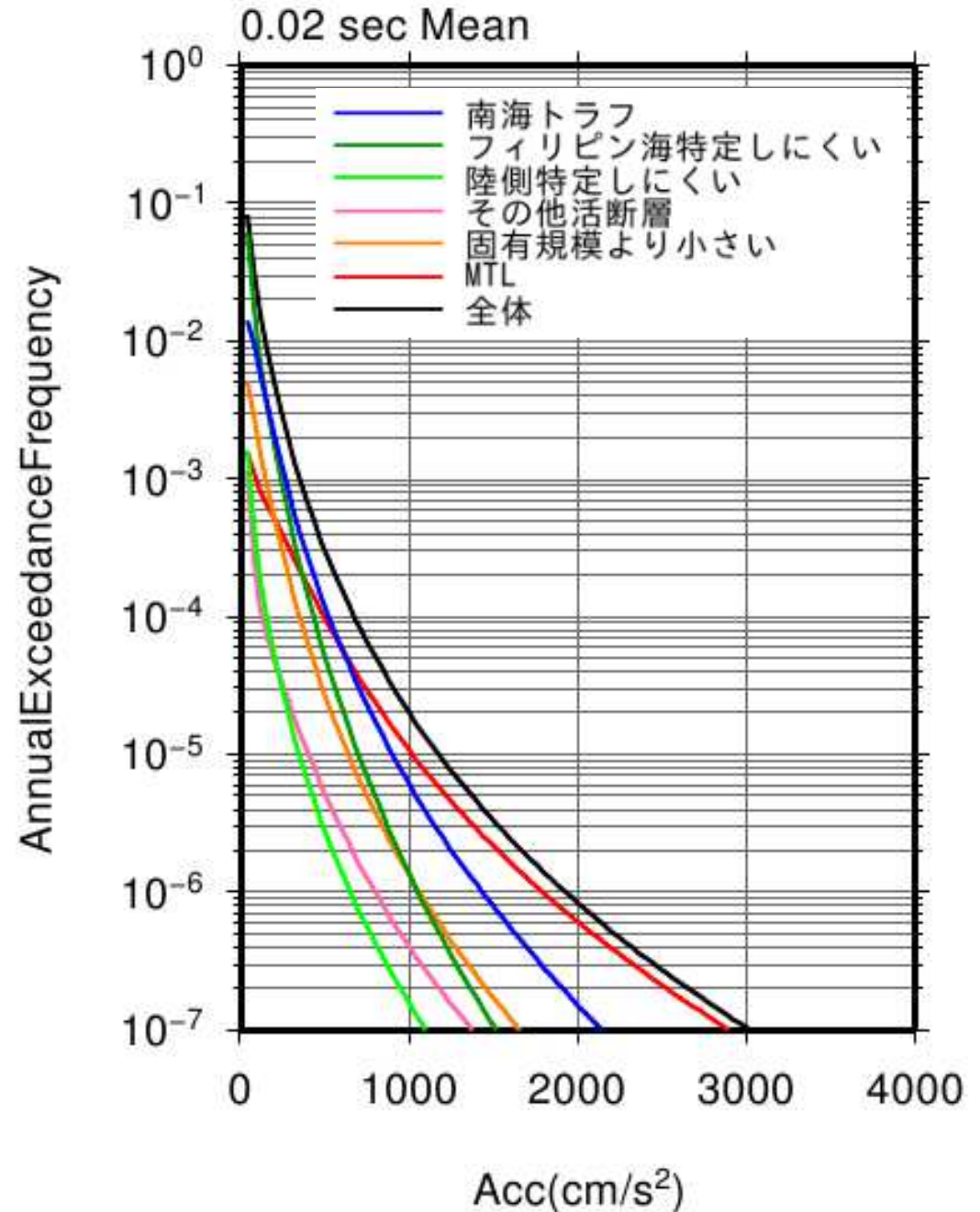
フラクタイルハザード曲線(全震源, 水平動)

# 地震ハザード評価結果(2/4)

- 地震ハザード解析結果を示す。
- 中央構造線断層帯の影響が最も大きく、次いで南海トラフの大地震の影響が大きい。
- 一様ハザードスペクトルから、伊方発電所において数百ガルのオーダーの加速度の年超過頻度は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 、千ガルを超えるような大加速度の年超過頻度は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ の極低頻度である。



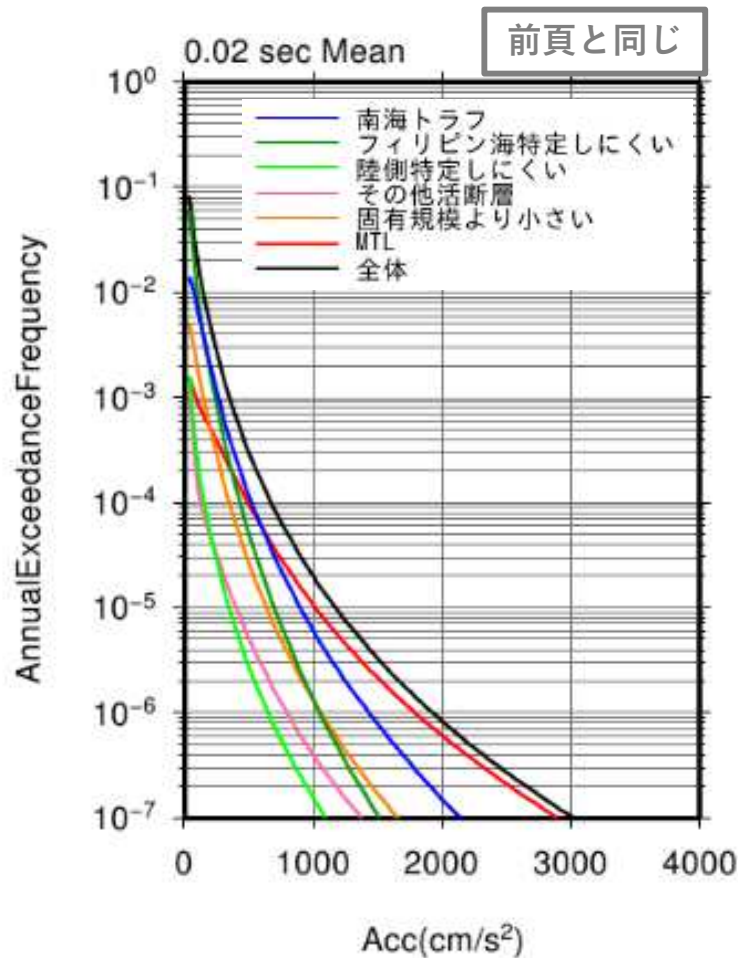
一様ハザードスペクトル (全震源, 水平動)



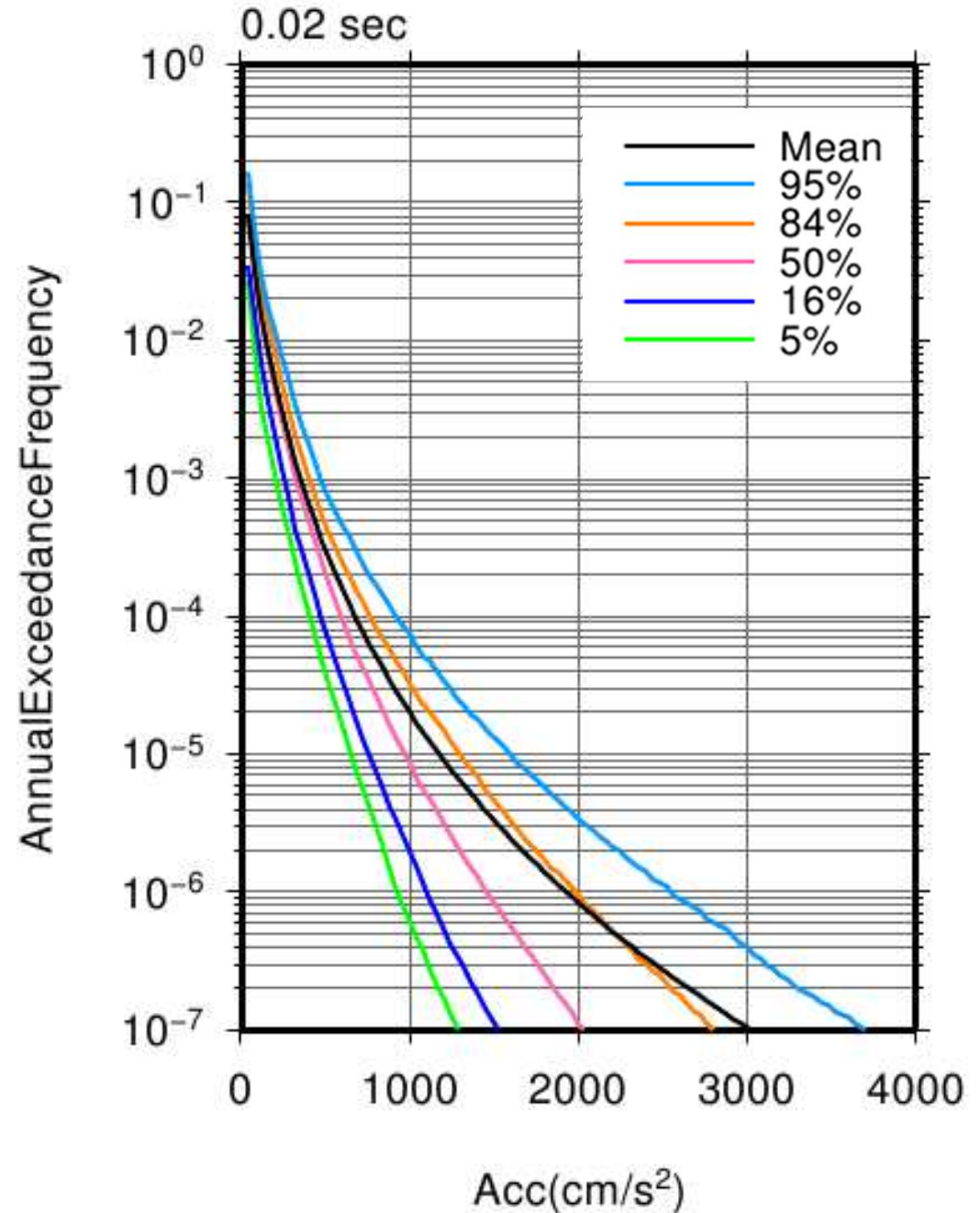
震源毎のハザード曲線の比較 (水平動, 平均値)

# 地震ハザード評価結果(3/4)

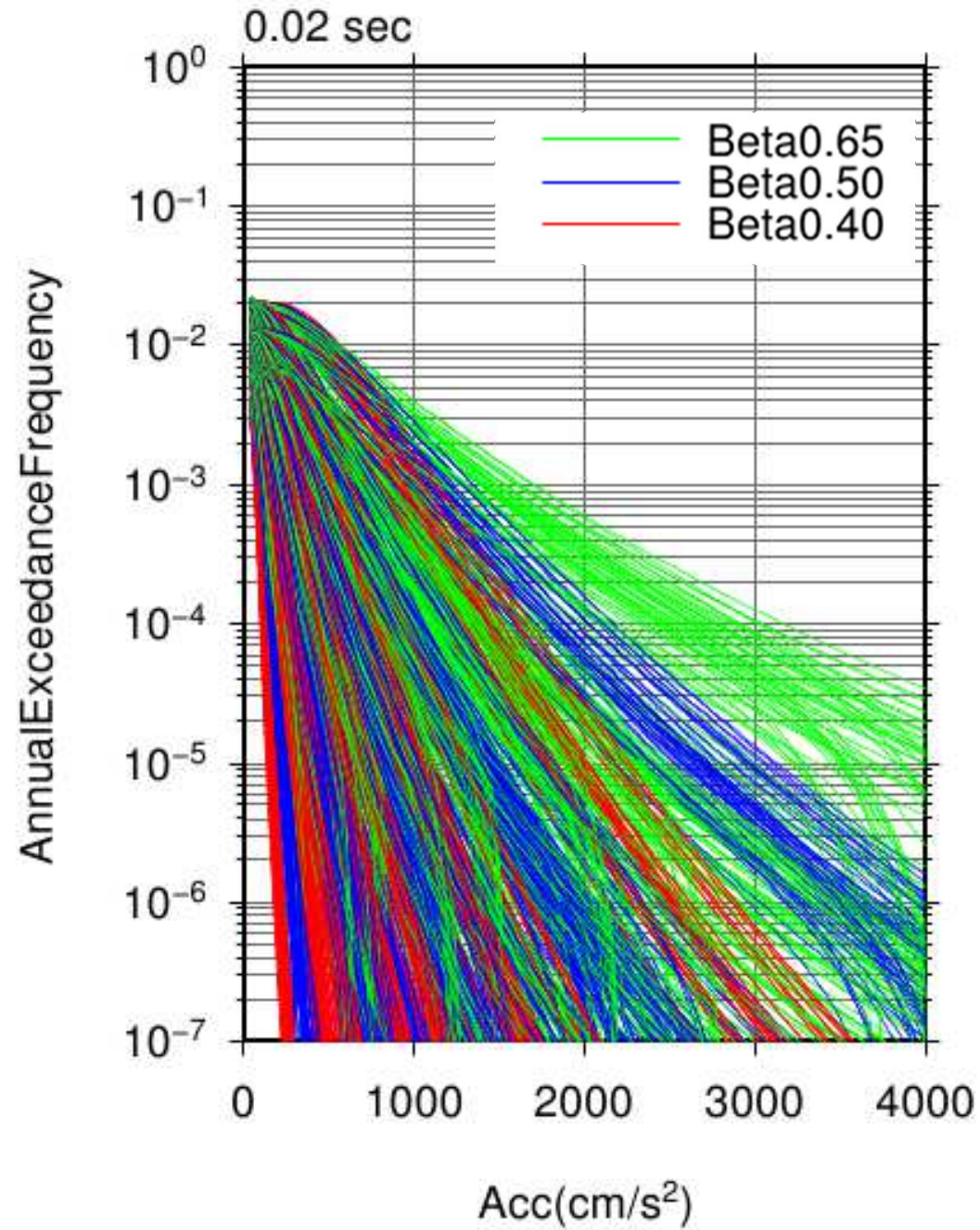
- 平均ハザード曲線は84%のフラクタイルハザード曲線と同程度となっている。
- これは、信頼度があまり高くはないが否定できないとTIが評価した一部の分岐が非常に高いハザードレベルの結果を与えるためと考えられる。



震源毎のハザード曲線の比較 (水平動, 平均値)



フラクタイルハザード曲線 (全震源, 水平動)



全分岐のハザード曲線の比較（南海トラフの大地震，水平動）

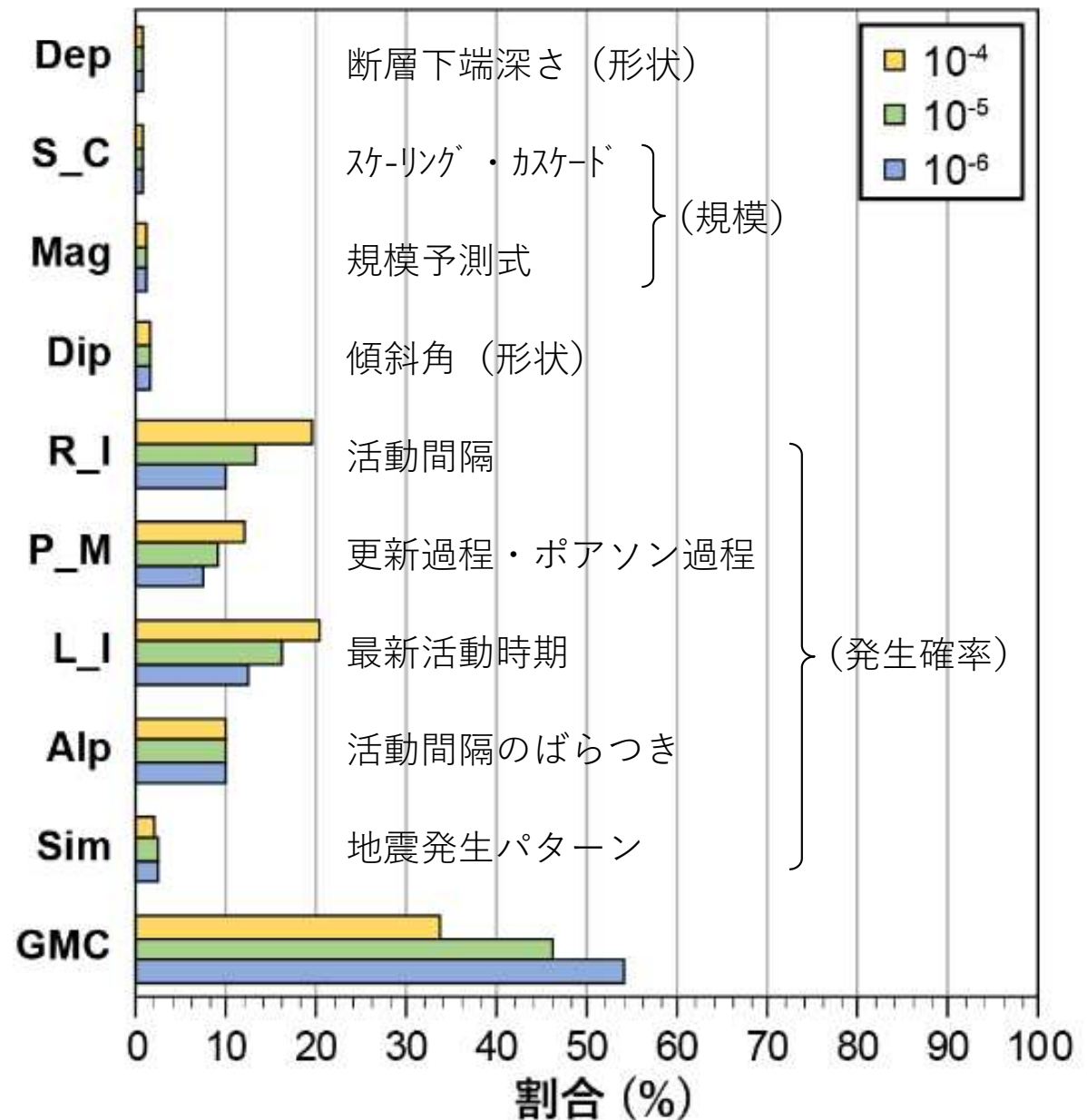
# SSCモデルの寄与度（中央構造線断層帯）

○中央構造線断層帯の地震ハザード解析結果において、年超過頻度が $10^{-4}$ の場合、発生確率の算定に関わる項目(R\_I, P\_M, L\_I, Alp, Sim)が約63%を占める。

○これは、伊予灘セグメントの活動履歴の解明が地震ハザードの信頼性向上に大きく寄与することを表すものであり、歴史記録の更なる発掘等を通じた最新活動時期の解明が期待される。

○一方、場所（位置・形状）に関する項目(Dep, Dip)や規模に関する項目(S\_C, Mag)は、専門家の意見が分かれる項目であるにも関わらず、影響は極めて小さい。

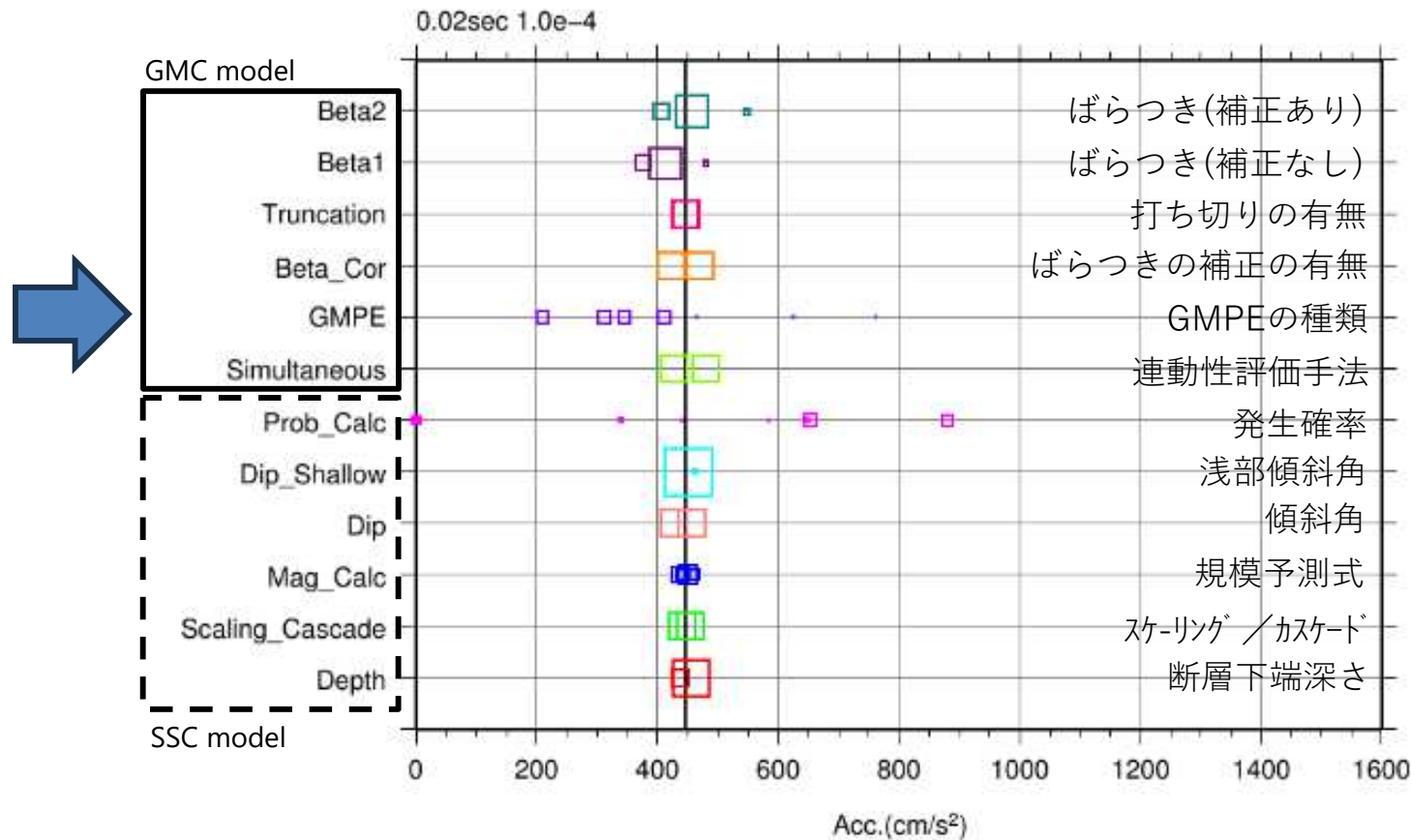
○この要因としては、伊予灘セグメント単独で伊方発電所における地震動レベルがほぼ頭打ちとなって他のセグメントと連動しても地震動レベルが変わらない状況にあることなどが挙げられる。



Depが断層下端深さ、S\_Cが連動時の地震規模評価手法、Magが地震規模予測式、Dipが断層傾斜角、R\_Iが平均活動間隔の算定方法、P\_Mが地震発生の時系列モデル、L\_Iが最新活動時期、Alpが活動間隔のばらつき、Simが連動性評価手法、GMCが地震動特性モデルの影響度の合計値を表す。

# GMCモデルの寄与度 (中央構造線断層帯) GMPE

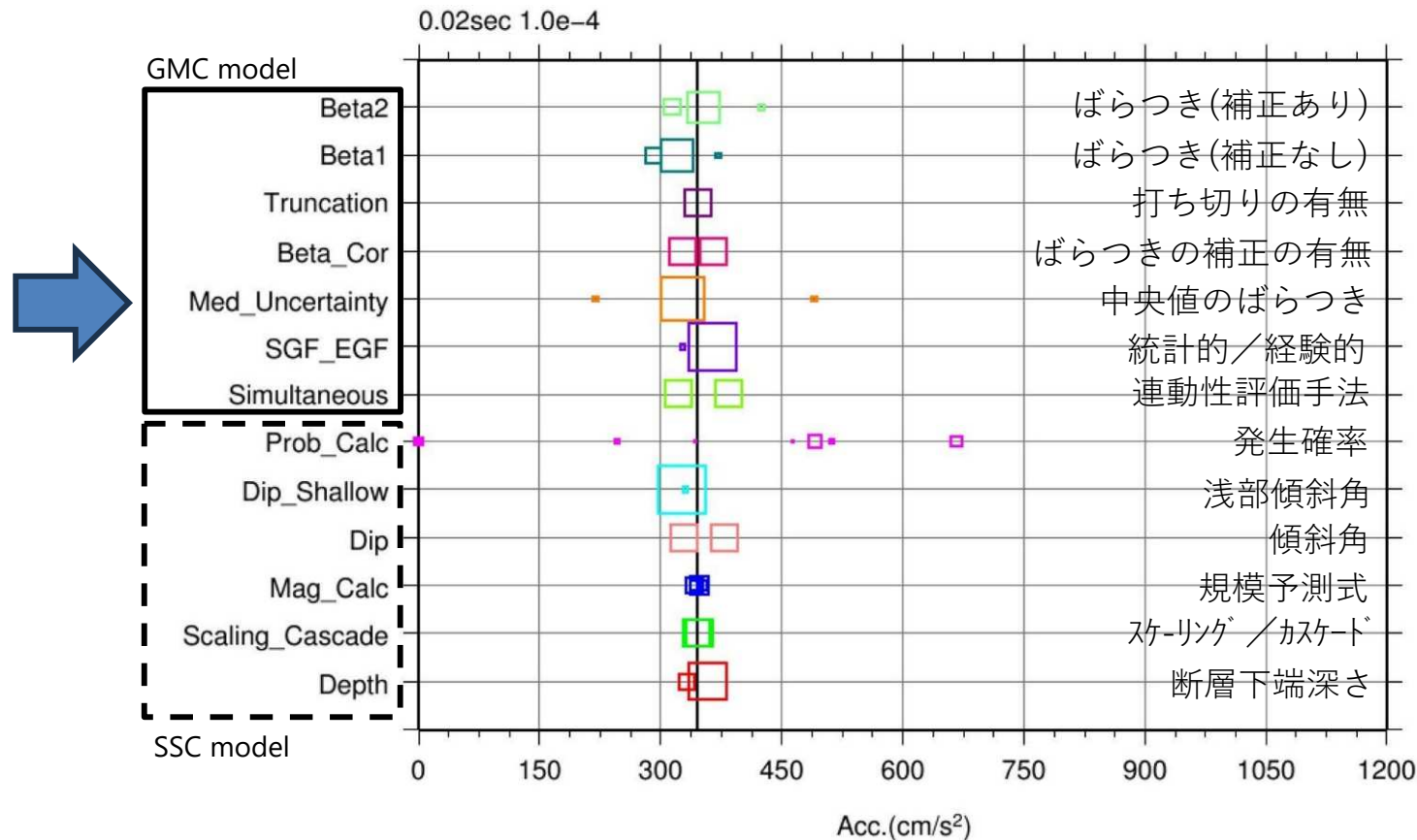
○GMCモデル (GMPEにる評価) の中では, 適用するGMPEの種類による影響が大きい。



中央構造線断層帯のTornado plot  
(水平動, 伊予灘セグメントを含む, GMPE)

# GMCモデルの寄与度 (中央構造線断層帯)断層モデル

○GMCモデル (断層モデルによる評価) の中では、中央値に与えるばらつきの影響が大きい。  
なお、GMPEにおいては、データベースの異なるGMPEを採用していることから、中央値のばらつきは設定していない。

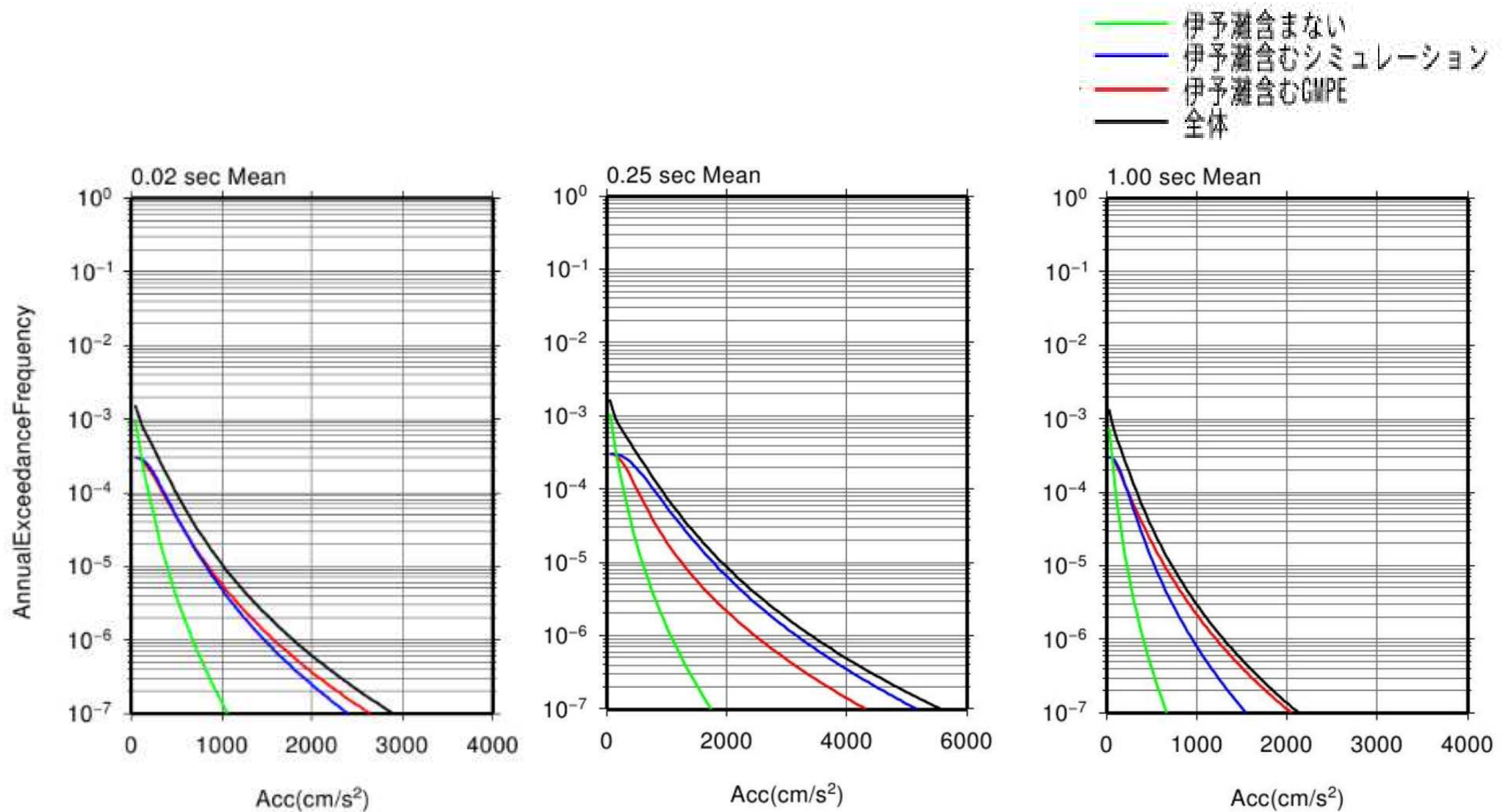


中央構造線断層帯のTornado plot  
(水平動, 伊予灘セグメントを含む, 断層モデル)



# GMCモデルの寄与度 (中央構造線断層帯)

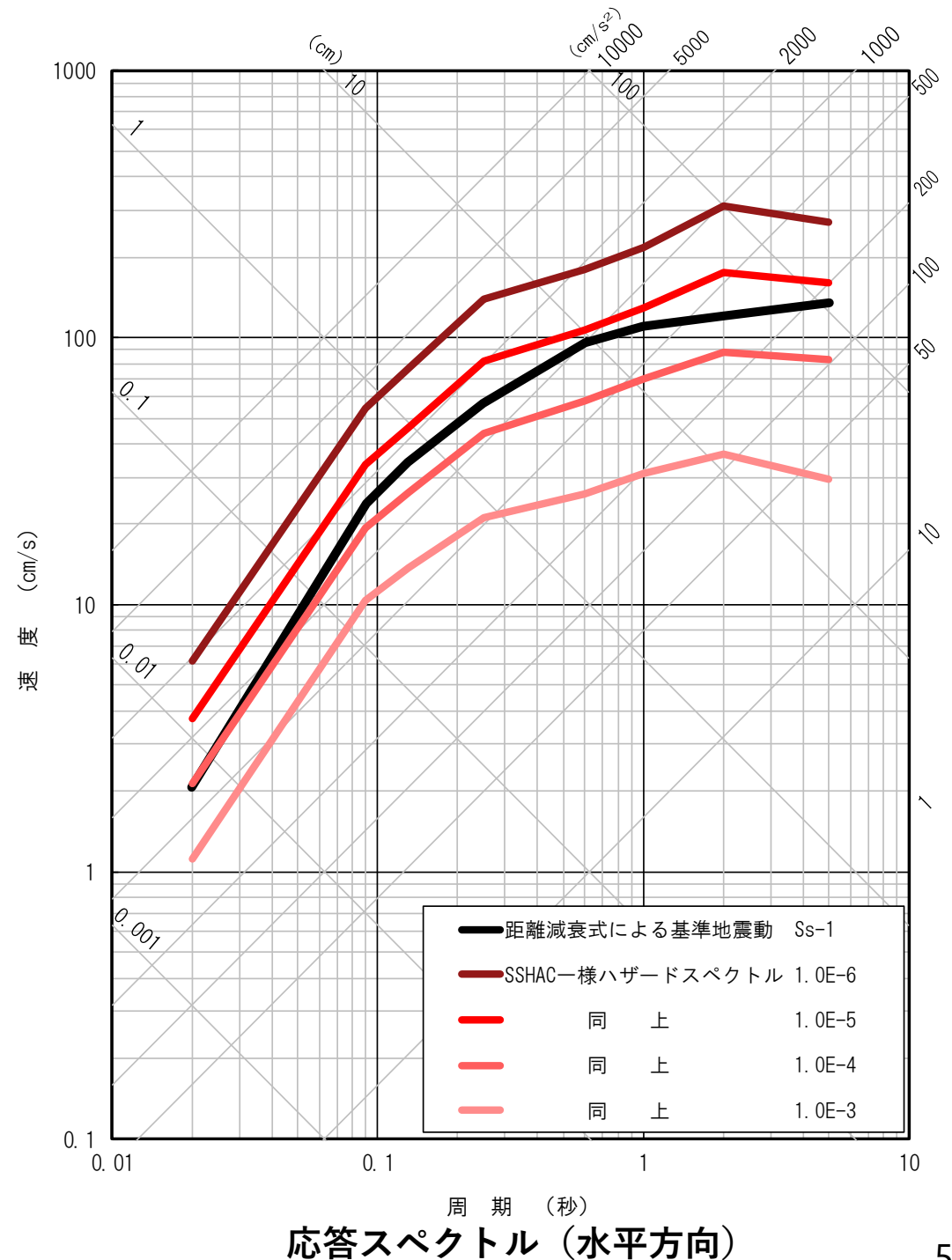
○GMPEと断層モデル (シミュレーション) を比較すると、**加速度レベルは概ね同等**である。  
ただし、周期によって両者の大小関係は異なっている。



伊予灘セグメントを含む場合と含まない場合のハザード曲線の比較  
水平動, 平均値

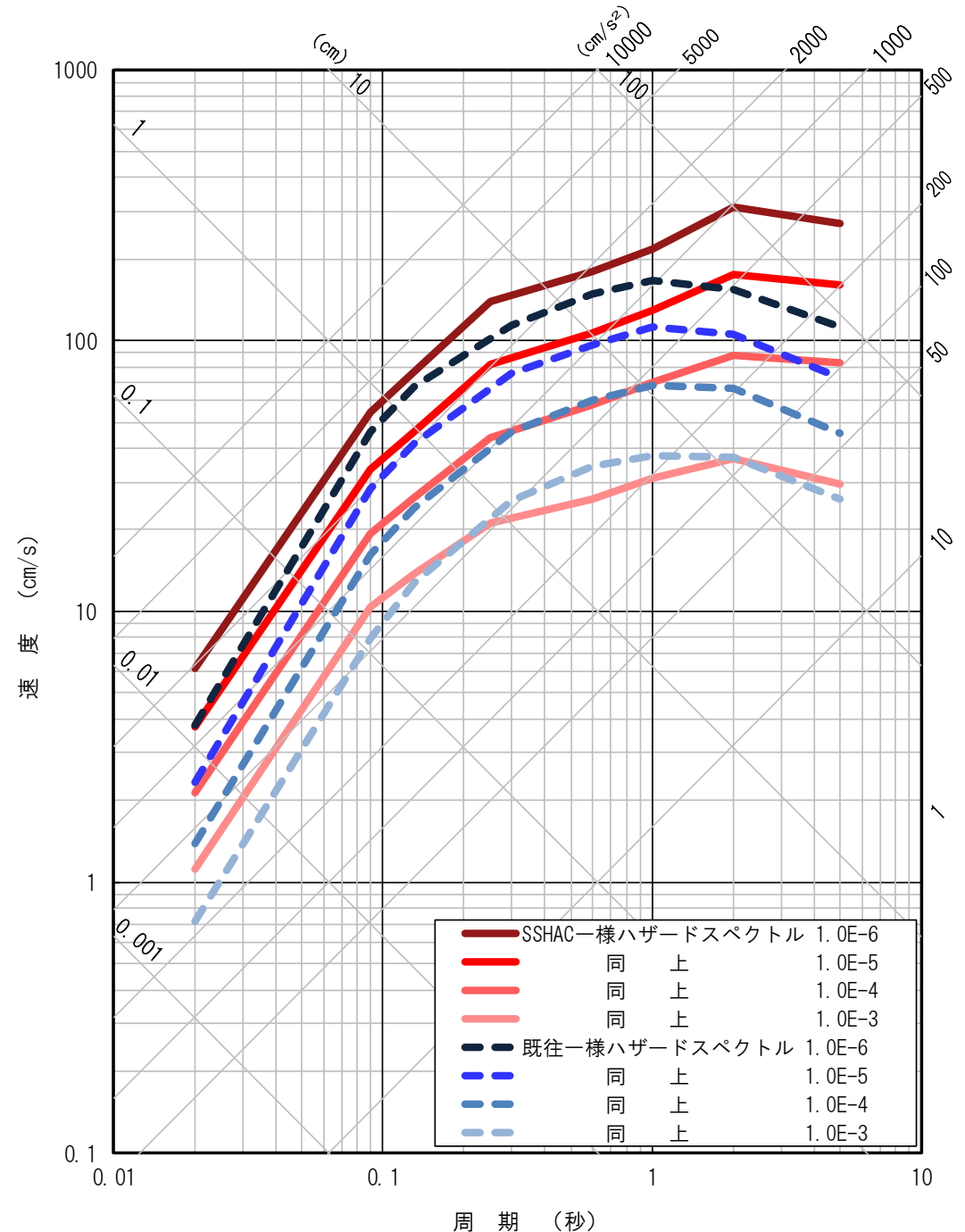
# まとめ(1/2) < 基準地震動Ssとの比較 >

- 一様ハザードスペクトルと伊方発電所の基準地震動を比較すると、基準地震動の年超過確率は概ね $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ であり、国際原子力機関（IAEA）や米国原子力規制委員会（U.S.NRC）の耐震基準に照らしても**妥当な地震動レベル**である。
- 決定論的に策定された伊方発電所の基準地震動が国際的な基準に照らして**妥当な水準**であることがSSHACガイドラインレベル3の導入によって明確となったと言える。



# まとめ(2/2) < 既往ハザード評価結果との比較 >

- 既往ハザード評価と伊方SSHACプロジェクトにおける一様ハザードスペクトルを比較すると、短周期側および長周期側において伊方SSHACプロジェクトにおける一応ハザードスペクトルが若干大きくなっている。
- 伊方SSHACプロジェクトでは、サイト補正してもなお硬岩サイトへ適用性が低いGMPEも採用するなど、不確かさを考慮する観点から多数の分岐を設定し、**既往ハザード評価では $10^4$ 程度だったロジックツリーの分岐数が、 $10^{25} \sim 10^{26}$ と過去に例がないほど膨大となっており、結果として、極低頻度ながらも非常にハザードレベルの高い一部の分岐の影響が表れるようになったことが、その一因と考えられる。**



応答スペクトル (水平方向)

## 発生確率，GMPE，ばらつき

- 中央構造線断層帯においては，発生確率に起因するばらつきが大き  
く，最新活動時期や履歴の解明が期待される。
- 中央値の不確実性を考慮する観点から，本来は伊方発電所のような  
硬岩には適性のないものを含めて複数のGMPEが採用された結果，  
一部のGMPEではサイト係数を補正しても地震動レベルが顕著に大  
きくなったことが課題に挙げられる。地震ハザード評価の更なる高  
度化（より精緻な評価）に向けた今後の課題として，NGA-West2  
のように，国内でも複数のチームが同一の地震動データベースに基  
づきGMPEを構築していくことが期待される。
- 地震動の有限性を考慮して実現象に即した評価を行うためには，理  
想的には，一般化パレート分布等の頭打ちを考慮した分布形状を採  
用すべきと考えるが，現状では適切な分布形状を議論するための  
データの蓄積や整理等が十分ではなく，将来的な課題と考えられる。

○本プレゼンテーションは多数の専門家が参画してまとめられた伊方SSHACプロジェクトの成果（最終報告書の内容）を紹介したものであり、以下に示す方々に厚くお礼申し上げます。

所属は当時のものです

## Project Technical Integrator

亀田弘行（京都大学名誉教授／電力中央研究所）

## Seismic Source Characterization Team Lead

隈元 崇（岡山大学）

## Ground Motion Characterization Team Lead

藤原広行（防災科学技術研究所）

## Seismic Source Characterization Team

奥村晃史（広島大学）

佃 栄吉（産業技術総合研究所）

堤 英明（電力中央研究所）

堤 浩之（同志社大学）

遠田晋次（東北大学）

徳山英一（高知大学）

## Ground Motion Characterization Team

蛭沢勝三（電力中央研究所）

香川敬生（鳥取大学）

司 宏俊（サイスモ・リサーチ／東京大学）

古村孝志（東京大学）

三宅弘恵（東京大学）

森川信之（防災科学技術研究所）

## Hazard Analyst

奥村俊彦（大崎総合研究所）

宮腰淳一（大崎総合研究所）

## Participatory Peer Review Panel

入倉孝次郎（京都大学名誉教授）

岡田篤正（京都大学名誉教授）

安中 正（東電設計）

宇賀田健（大成建設）

Martin McCann（Stanford大学）

## Advisor

George Apostolakis（電力中央研究所）

Kevin Coppersmith（Coppersmith Consulting）