

全体要旨

この報告書は四国電力株式会社（以下、「四国電力」という。）伊方発電所（以下、「伊方サイト」という。）の確率論的地震ハザード解析（Probabilistic Seismic Hazard Analysis, 以下、「PSHA」という。）に関して、我が国で初めて米国の Senior Seismic Hazard Analysis Committee（以下、「SSHAC」という。） Level 3 を適用した経緯と結果についてとりまとめたものである。

1. プロジェクトの目的と展望

我が国における原子力発電所の耐震安全性評価に用いられる基準地震動 S_s については、規制要求に基づき、将来発生する地震の不確かさを踏まえた決定論的な評価がなされている。一方、規制要求における確率論的な評価については、決定論的に評価された S_s の妥当性を確認するための一要素として、 S_s に対する超過確率を参照することが求められている。そのために、電力事業者は PSHA を実施している。

2011 年東京電力株式会社(当時)福島第一原子力発電所事故を契機として、地震、津波をはじめとした低頻度の外的事象によるリスクを低減していくことが必要であり、確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment, 以下、「PRA」という。）とその結果に基づくリスク情報を活用した意思決定（Risk-Informed Decision-Making, 以下、「RIDM」という。）の定着が課題と認識された。この課題を解決するために、2014 年 10 月、電力中央研究所内に原子力リスク研究センター（Nuclear Risk Research Center, 以下、「NRRC」という。）が設置された。

四国電力及び NRRC では、地震 PRA の高度化のためには、その前提となる PSHA の高度化が必須と認識し、伊方サイトを対象として、国外では規制

要求に基づき多数実施されている米国の SSHAC Level 3 に基づく PSHA を我が国で初めて実施することとした。

米国を含め海外における SSHAC Level 3 に基づく PSHA の多くが規制要求に基づいて実施されているのに対して、伊方サイトの SSHAC Level 3 プロジェクト（以下、「伊方 SSHAC プロジェクト」）は、上記のような我が国の実情のもとで、PSHA の高度化によって更なる安全性向上を目指す四国電力による自主的な検討である。この検討の成果は伊方サイトに限定されるものではなく、我が国における PSHA の普遍的な高度化に寄与することに大きな意義がある。

伊方 SSHAC プロジェクトの到達点は、SSHAC Level 3 に基づく PSHA を実施し、伊方サイトの地震 PRA に資する技術的に正当性のある確率論的地震ハザード曲線（以下、「ハザード曲線」という。）を作成することである。

具体的な検討の仕様は以下のとおりである。

- 評価地点は伊方発電所 3 号炉心（東経 132.311 度，北緯 33.491 度）とし， $V_s 2.6 \text{ km/s}$ の解放基盤表面（EL.+10.0m）における地震動とする。
- サイトの供用期間を踏まえ，地震発生確率を算出する期間は 50 年として，計算の起点は 2019 年 1 月 1 日とする。
- 対象とする地震動の周期は，PRA 評価対象施設の固有周期特性を勘案し，0.02 秒～5 秒とする。
- ハザード曲線は，加速度応答スペクトル（減衰定数：5%）に基づき算出することとし，地震 PRA に影響を及ぼす応答加速度レベルについて精度を有するものとする。
- PSHA の出力は，周期毎（0.02 秒，0.09 秒，0.13 秒，0.25 秒，0.60 秒，1.00 秒，2.00 秒，5.00 秒）のハザード曲線（水平，鉛直）と一様

ハザードスペクトル（水平、鉛直）とする。

- 建屋・機器 fragility 評価における現実的応答評価では、解放基盤表面で定義されるハザード曲線に基づく入力地震動を用いて応答解析が実施される。この入力地震動のスペクトル形状の設定に係る不確かさは fragility 評価側で考慮されるため、本検討での考慮は不要である。

本プロジェクトは上述のとおり、伊方サイトの地震 PRA に資する PSHA の高度化という工学的な目的に基づくものである。したがって、検討の全過程を通じて、ハザード曲線に対する影響度の高い要因から優先的に検討対象とするように順位付けを行い、限られたリソースの有効活用によって妥当な成果を得るように努めた。

なお、検討の進捗に応じて、感度解析等により当初の予想と異なる影響が認識されるケースもあったが、そのような場合においては、適時適切な優先順位を付与して的確な検討を実施した。

以上のとおり、本プロジェクトは伊方サイトの地震 PRA を実施するための検討過程として実施されたサイト単位の PSHA であり、SSHAC Level 3 ガイドラインを討議の枠組みに据えて、検討を実施した。

1.1 検討体制/検討手順：SSHAC Level 3

本プロジェクトは、次に示す SSHAC Level 3 に関する米国ガイドライン（以下、「SSHAC ガイドライン」という。）に従って実施された。

- ・ NUREG/CR-6372, Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis : Guidance on Uncertainty and Use of Experts
- ・ NUREG-2117, Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level

3 and 4 Hazard Studies

- ・ NUREG-2213, Updated Implementation Guidelines for SSHAC Hazard Studies

NUREG-2213 では SSHAC の必要な 5 要素として次の事項を挙げている。

- ・ 全ての参加者に対して明確に定義された役割を付与すること。
- ・ PSHA に関連する使用可能な全てのデータ、モデル、手法に関して客観的な評価を行うこと。
- ・ 現状の情報や関連する不確実さに関して最適な評価に基づく統合によりモデルを構築すること。モデルは技術的に十分主張できる解釈に基づく中央、分布形、範囲(Center, Body, Range of Technically Defensible Interpretation, 以下、「CBR of TDI」という。)を的確に表現すること。
- ・ 検討内容は十分な精度で文書化されること。
- ・ 独立の参加型のピアレビューを行う Participatory Peer Review Panel (以下、「PPRP」という。)によって、検討がレビューされること。

本プロジェクトにおいても当然のことながら、上記の要求事項については的確に順守して検討が進められた。

検討に際し、将来発生する地震の不確かさは、自然現象のランダム性に起因する偶然的ばらつき(Aleatory variability)と、不十分な認識に起因する認識論的不確実性(Epistemic uncertainty)に大別される。前者は確率分布としてモデル化されるのに対し、後者は専門家判断に基づいて評価するしか方法がないものであり、専門家意見を体系的に集約したロジックツリーで表現される。SSHAC ガイドラインは、このような不確かさを適切に

処理するための厳格な手順を定めるもので、特に、認識論的不確実性の評価において決定的に重要な役割を果たす。

本プロジェクトでは、SSHAC ガイドラインに基づき、特に以下の 3 点に留意して検討を進めた。

- ① PSHA に関わる地震学、地質学、地震工学といった関連分野の CBR of TDI を明らかにする。
- ② 技術的検討は個人ではなく、Technical Integrator (以下、「TI」という。) チームとして実施する。TI チームは十分な専門的知見と幅広い視野から議論する資質を持つ研究者・技術者から構成され、直接対面で議論することを基本とする。TI チームの議論は TI Lead が責任をもって進め、議論の内容やそのとりまとめ結果については TI チームが責任を負う。
- ③ 議論の各段階で Workshop を開催し、プロジェクトの具体的な進捗状況を公開するとともに、関連分野の異なる意見を求めるなど、外部との意見交換を行い、その結果をプロジェクトの実行に反映する。

これらの 3 つの枠組みについて、①は主としてプロジェクトの「説明性」を、②は「質」を、③は「透明性」をそれぞれ担保するものである。

また、本プロジェクトが我が国で初の SSHAC Level 3 プロジェクトであり、日本国内では過去に SSHAC Level 3 プロジェクトへの参画関係者が存在しないことを踏まえ、検討の手順、内容、質が SSHAC Level 3 の水準を満足できるように、PSHA や評価対象となる地震の震源特性や地震動特性に詳しい日本国内の専門家に加えて、米国の SSHAC 関連の専門家に対しても本プロジェクトへの参画を要請した。

結果的に、本プロジェクトの検討体制は第 1 図に示すとおりとなった。この体制において、モデル構築に関わる技術的判断の責任は全て TI チー

ムにあり、Project Sponsor である四国電力の解釈に左右されることは許されない。

米国の SSHAC 関連の専門家としては、NRRC の George Apostolakis 所長（前述の NUREG/CR-6372 の著者の 1 名）に加え、同じく NUREG/CR-6372, NUREG-2117, NUREG-2213 の著者であり、過去に多くの SSHAC Level 3 プロジェクトの経験を有する Kevin Coppersmith 氏が Advisor として参画することになった。また、同じく過去に SSHAC Level 3 プロジェクトの経験を有する Martin McCann 氏が PPRP の 1 名として参画することになった。

PSHA の入力としては、震源に関する特性（Seismic Source Characterization, 以下、「SSC」という。）及び地震動評価に関する特性（Ground Motion Characterization, 以下、「GMC」という。）のモデル化が必要である。SSC モデルでは、考慮すべき全ての震源の位置、規模や活動間隔について、GMC モデルでは、地震動の評価手法、伝播過程、敷地の増幅特性等について、各々検討が必要となる。

SSHAC ガイドラインでは、プロジェクトに係る関係者の明確な役割と責任を定めており、全ての技術的な検討は TI チームによって実施されることとなる。

本プロジェクトでは、過去の SSHAC Level 3 プロジェクトや前述の SSHAC ガイドラインに従い、これら SSC モデル、GMC モデル各々の検討について各々の TI チーム(SSC TI チーム及び GMC TI チーム)を設置して検討を進めることとした。その他、SSHAC ガイドラインに照らして、PPRP, Hazard Analyst(HA), Database Manager(DM), Resource Expert（以下、「RE」という。）、Proponent Expert（以下、「PE」という。）等を適切に選定した。

SSHAC ガイドラインに基づく本プロジェクトの検討手順は第 2 図に示すとおりであり、検討は 3 段階に分けられる。

第 1 段階は”Evaluation”であり、TI チームは PSHA に使用可能なデータや手法、モデルに関してその質や信頼性、特に当該地点への適用性に関して評価を行う。そのために、TI チーム は、Workshop #1 では RE と呼ばれる外部専門家を招聘して PSHA に関する重要検討事項（Hazard Significant Issues, 以下、「HSI」という。）について使用可能なデータや手法に関する説明を受けるとともに、Workshop #2 では PE と呼ばれる外部専門家から特定のモデルに関する説明を受け、直接 TI チームと PE 間で議論を行う。

“Evaluation”に引き続く”Integration”では、TI チームは SSHAC の基本的な概念である CBR of TDI を達成するロジックツリーを構築する。この検討段階ではまず、一次モデル(Preliminary Model)を作成し、当該のモデルでハザード解析を実施する。この結果（特に感度解析結果）及び PPRP からの一次モデル(Preliminary Model)に関するコメントをフィードバックとして Workshop #3 で受けることにより、その後の最終モデル(Final Model)作成へと移る。

最終モデル(Final Model)の検討内容は、最終段階の“Documentation”で的確に文書化されることが要求される。

以上の全ての検討過程は、PPRP によってレビューを受ける。PPRP によるレビューは、技術的な観点、すなわち TI チームによって作成されたモデルが CBR of TDI を満たしているかとの観点に加え、SSHAC の検討手順を満足しているかの観点からも実施される。

なお、検討体制の特記事項として、SSC TI チームと GMC TI チームのインタラクション(役割分担と連携方法)の検討が挙げられる。すなわち、

全ての検討は SSC TI チームと GMC TI チームに 2 分した実施が可能ではなく、境界領域の検討に関して SSC TI チームと GMC TI チームの相互の議論が必要不可欠となる。したがって、検討の全過程に亘って SSC TI チームと GMC TI チームの相互の認識共有、議論の場を設置して検討を進めた。

本プロジェクトは、2016 年 3 月から 2020 年 10 月まで実施された。キックオフ会議、Workshop #1-#3, Working Meeting #1-#5 は全て東京で開催された。

Workshop #1 では、TI チームにより特定された HSI 及びこれに関連するデータや手法、モデルに関する情報が RE から提供された。Workshop #2 では、各種の重要検討項目に関する代替モデルに関して PE から情報提供され、TI チームとの間で議論がなされた。Workshop #3 では、TI チームによって作成された一次モデル (Preliminary Model) に基づくハザード解析結果 (各種感度解析結果) の説明及び PPRP からのフィードバックを受けた。SSC TI チーム、GMC TI チーム各々で 5 回 (合計 10 回) 開催された Working Meeting では、これらの Workshop を補完する議論や検討がなされた。

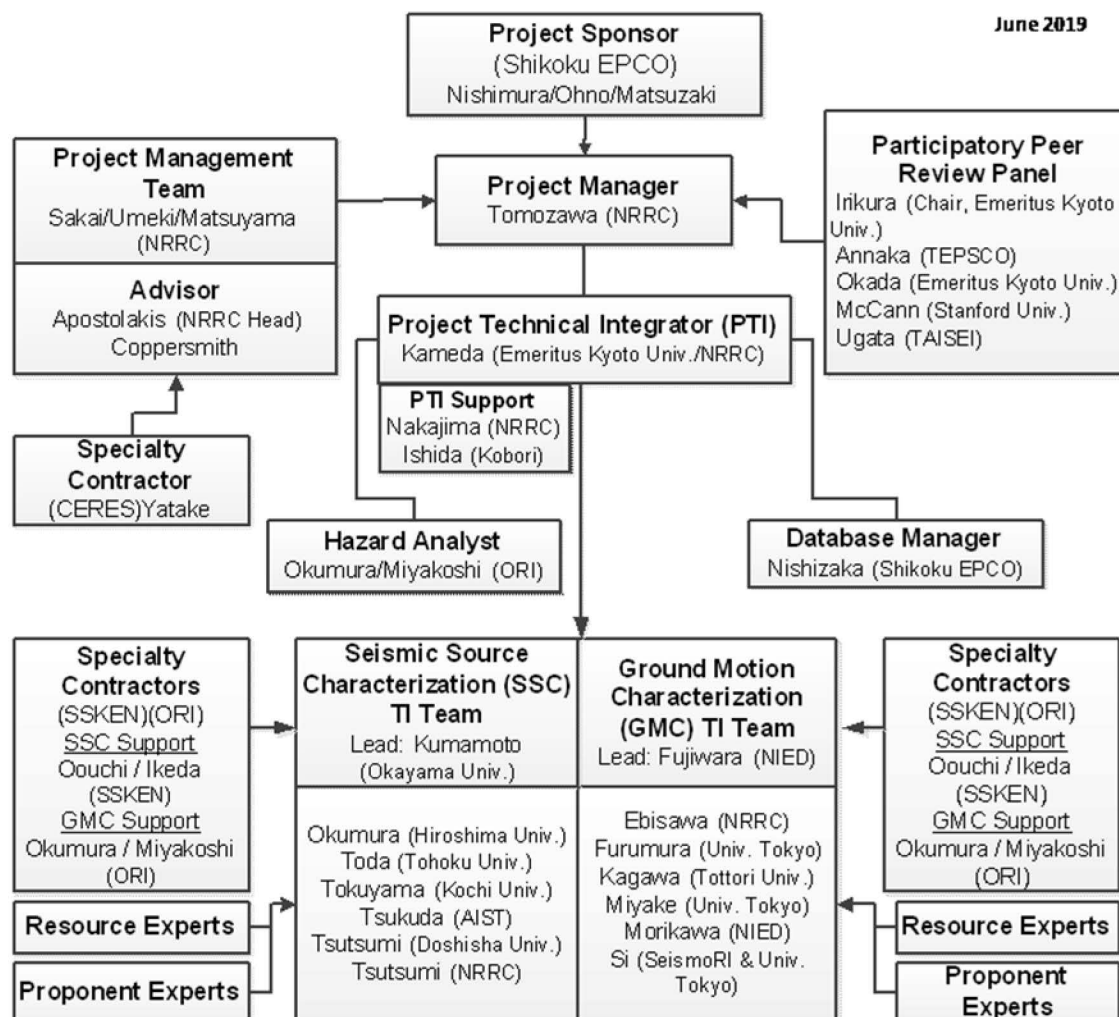
Workshop には TI チーム全てのメンバー、PPRP, Advisor の Copper-smith 氏が参加し、さらに規制関係者や電力事業者等が傍聴した。Working Meeting は SSC TI チーム、GMC TI チーム各々で開催され、当該の TI チーム全員及び PPRP の代表者、PPRP のうち McCann 氏又は Advisor の Copper-smith 氏の SSHAC Level 3 プロジェクトの経験を有する米国専門家のいずれか 1 名が必ず参加するとともに Workshop 同様、規制関係者等が傍聴した。

さらに、日常的な TI チーム内の議論としては TI チームとしての準備

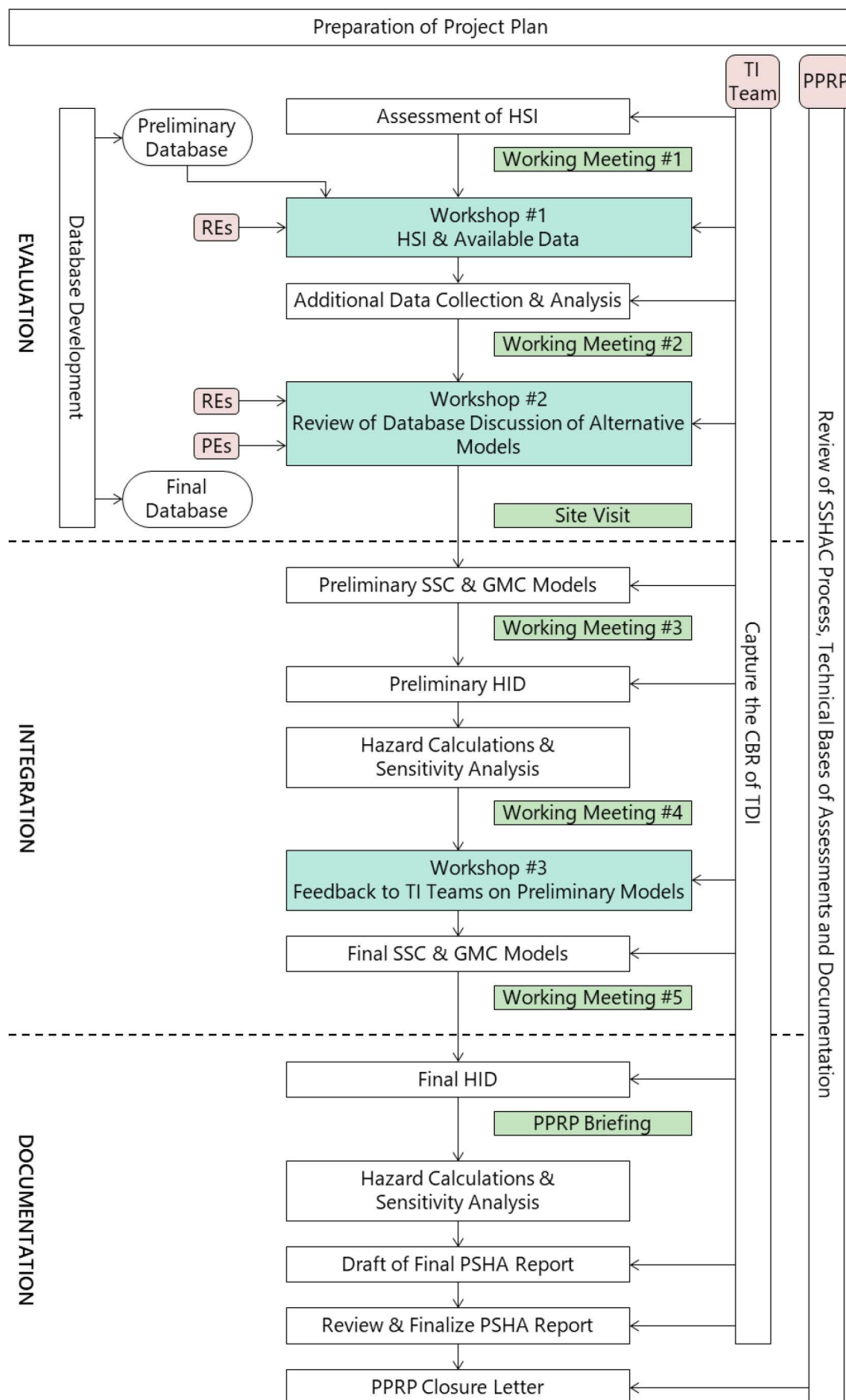
会合等を実施して検討を進めた。また、本プロジェクトが我が国初の SSHAC Level 3 プロジェクトであることを踏まえて、適宜、PPRP と TI チームが議論できる場を設定した。

以上の検討体制や検討手順に関して、本プロジェクトにおいては基本的に SSHAC ガイドラインを踏襲して実施している。しかしながら、体制面で海外の SSHAC Level 3 プロジェクトとは異なる面がある。本プロジェクトでは、日本国内の既往評価（地震調査研究推進本部（以下、「地震本部」）の審議会による評価等）でみられるように、TI チームは大学や研究機関の関係者を中心に構成したものの、1 民間プロジェクトである本プロジェクトへの関与には、組織毎に時間的、作業的に一定の制限があった。そのため、本プロジェクトでは『TI サポートチーム』を設置し、基礎資料の整備、議論用資料の作成等を TI チームと一体として行う体制とした。なお、この体制下でも全ての意思決定は TI チームによりなされている。

June 2019



第 1 図 検討体制



第2図 本プロジェクトの検討手順

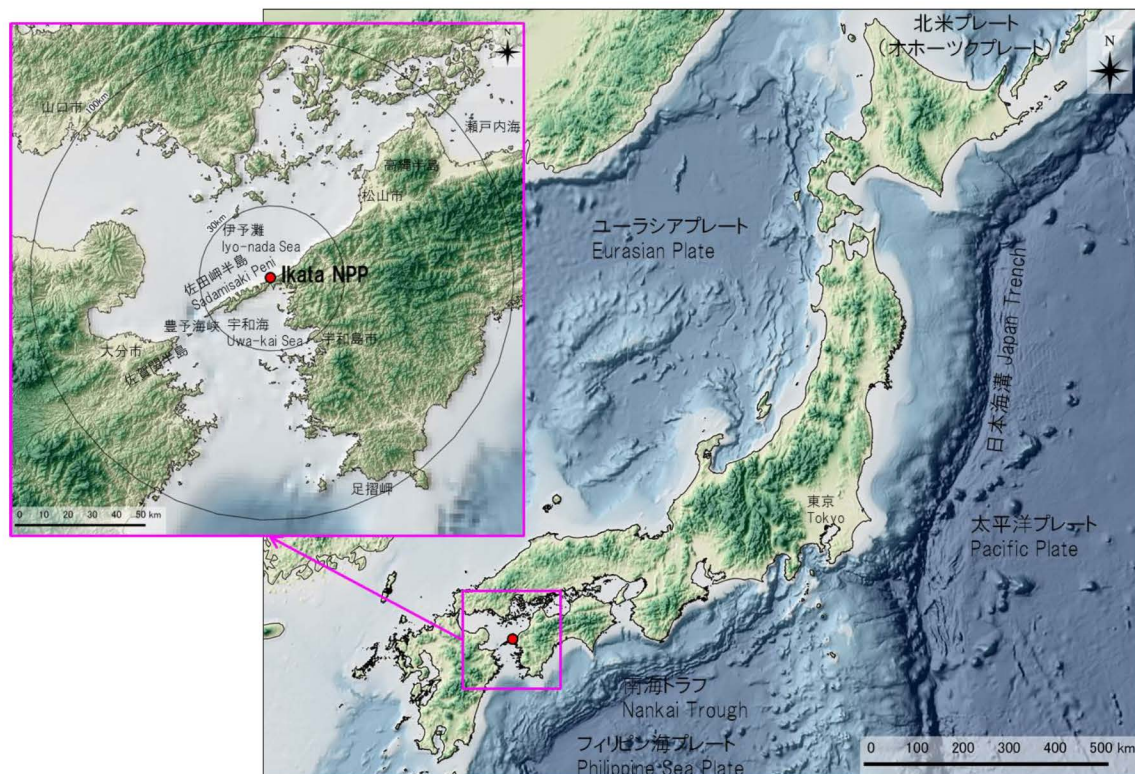
1.2 伊方サイトの地震環境

伊方サイトは、四国西部の愛媛県伊方町に位置している（第3図）。伊方サイト周辺の地震テクトニクスは、南方の南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートと島弧中央断層である中央構造線断層帯によって特徴付けられ、伊方サイトは中央構造線断層帯南方の前弧スリバーに位置する。伊方サイト周辺の地震テクトニクスの概念図を中央構造線断層帯と直交方向の断面として第4図に示す。伊方サイトは、「南海トラフの大地震」の想定震源域北限に位置し、その深部ではフィリピン海プレートの沈み込みに対応して北西方向に向かって深くなる「フィリピン海プレートの特定しにくい地震」の活動が認められる。また、伊方サイト周辺には、東北東－西南西走向で右横ずれの中央構造線断層帯のほか、これと並走する右横ずれ活断層が分布する。浅部の地震発生層では、これらの内陸活断層に起因する「中央構造線断層帯の地震」や「その他内陸活断層の地震」（「内陸活断層の固有規模より小さい地震」を含む）が発生するほか、活断層が特定されていない場所で「陸側プレートの特定しにくい地震」も発生する。

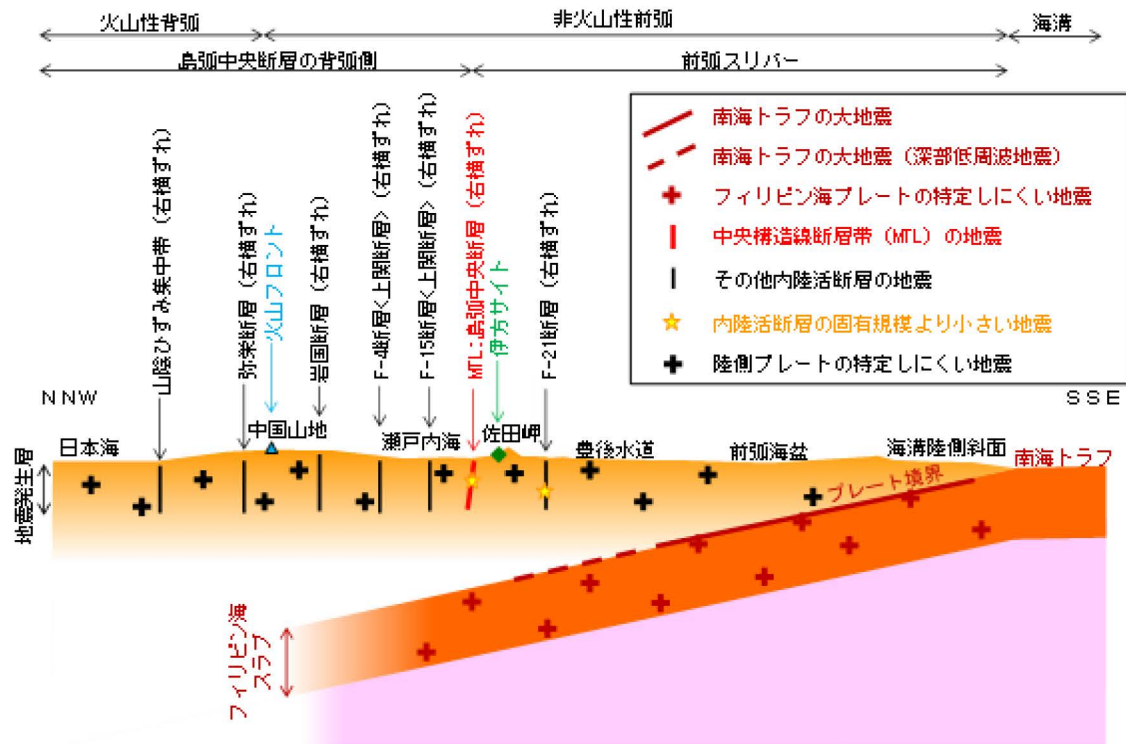
日本列島の西南日本の地質は、島弧の方向に帯状を呈し、中央構造線を境に北側の内帯と南側の外帯に区分される。サイト北側の内帯は領家帯に属し、高温低圧型の変成作用を受けた領家変成岩類のほか、領家花こう岩類、広島花こう岩類及び和泉層群が分布する。一方、サイト周辺の外帯の地質は、その時代・岩相等によって北から三波川帯、秩父累帯（北部秩父帯、中部秩父帯、南部秩父帯）及び四万十帯に分けられる。伊方サイトの位置する佐田岬半島には三波川帯に属する塩基性片岩が広く分布する。

伊方サイト内で実施したPS検層の結果によると、地下浅部で $V_s=2\text{km/s}$ を超え、地下深部では $V_s=3\text{km/s}$ 超の非常に速い速度を示し深度方向に漸増する。伊方サイトでは、詳細な調査の結果から地震動増幅の要因とな

るような地下構造は認められず、また 1975 年以降の地震観測記録によっても、伊方サイトでは特異な地盤増幅が生じないことが判明している。



第 3 図 伊方サイトの位置



第4図 伊方サイト周辺の地震テクトニクス概念図（MTL 直交断面）

2. PSHA 検討のための技術的基盤

伊方サイトの PSHA 検討における技術的基盤は，“Evaluation”と“Integration”による SSHAC Level 3 による過程によって構築された。“Evaluation”では，学会等の技術的コミュニティで認知，認識されているデータやモデル，手法に関して特定，分析，評価が行われた。“Integration”の段階では，TI チームは CBR of TDI を表す SSC モデル及び GMC モデルを構築した。

“Evaluation”段階では，SSC モデルや GMC モデルの HSI に関連した学術論文や調査結果，地震カタログ等に関する分析，評価を行った。これらの過程は主として Workshop #1 で RE からのデータ提供も含め精力的に実施され，さらに検討の進捗に応じて追加的なデータやモデル，手法に関する議論は Workshop #2 においても実施された。

我が国特有の観点での“Evaluation”に関する特記事項としては，地震本部等公的機関による評価結果の取扱いに関する点が挙げられる。これらの公的機関による評価結果については，その評価過程が当然のことながら SSHAC Level 3 による検討に基づいていないことから，当該の結果をそのまま採用することは不適切であり，原データ等に立ち返ってその妥当性を評価することが必要とされた。

2.1 SSC データ

データベース構築の目的は，本プロジェクトにおける PSHA に関する文献等を収集し，TI チームを含めたプロジェクト関係者で共有するとともに，PSHA の客観的論拠とすることである。TI チームの効率的な議論・作業のため，プロジェクトの初期段階からデータベースの構築を進め，最終モデル(Final Model)構築までデータを収集した。

SSC データベースは、NUREG-2117 を参考に文献の出典リストにデータの評価 (Data Evaluation Table : DET) を追記する表形式のフォーマットで構築した。文献は、伊方サイトにおける既往の設置変更許可申請や PSHA で用いられた一般公開文献や調査資料のほか、伊方サイト周辺の地形、地質、地震及び PSHA に関連する国内外のデータや海外の SSHAC Level 3 プロジェクトの事例を幅広く収集・整理するとともに、モデル作成や PSHA に有用な文献を中心に収集した。本プロジェクトの公開会合 (Workshop) で議論されたデータ (RE や PE による発表資料や引用された文献) についてもデータベースとして登録した。

PSHA に際して、地震活動度に関するデータとして地震カタログが非常に重要である。本プロジェクトにおいて、解析に用いる震源データとした「伊方 SSHAC カタログ」には、①長期間の記録を有すること、②網羅的に記録されていること (検出精度が優れていること)、③非定常的な地震が含まれていないことの 3 つの条件を踏まえ、1997 年 10 月 1 日から 2016 年 5 月 31 日までの期間に発生した、 $M \geq 1.0$ の気象庁一元化震源を Reasenberg (1985) の手法により除群して用いた。

本プロジェクトでは、検討の対象とする次の 6 タイプの地震の SSC モデルを構築するため、(a) 場所 (位置・形状)、(b) 規模、(c) 発生確率に関連する詳細かつ幅広いデータを収集した。

- (1) 南海トラフの大地震
- (2) フィリピン海プレートの特定しにくい地震
- (3) 中央構造線断層帯の地震
- (4) その他内陸活断層の地震
- (5) 内陸活断層の固有規模より小さい地震
- (6) 陸側プレートの特定しにくい地震

なお、伊方サイトでは Project Sponsor の四国電力が自主的な研究活動として、長年にわたって各種調査を継続してきたことで豊富なデータを蓄積していた。それにより、最新データ等も十分踏まえた検討が当初から実施可能な状況であったため、本プロジェクト実施中に追加調査の必要性等が議論となることはなかった。

2.2 GMC データ

本プロジェクトにおける GMC に係るデータベース構築のための検討事項は、1)地震動データベースの作成、2)サイトに適用可能な地震動予測式（Ground Motion Prediction Equation、以下、「GMPE」という。）の選定及びサイト特性の補正、3)断層モデルを活用することの妥当性評価である。

2.2.1. 地震動データベースの作成

伊方サイトでは、前述のとおり 1975 年から地震観測を開始している。2016 年 12 月までに最大加速度が 2cm/s^2 以上を記録した地震は 57 地震ある。なお、これらの地震のほとんどはフィリピン海プレート内部で発生した地震であり、内陸地殻内地震は多くない。観測された地震動の最大加速度（水平）は 90 cm/s^2 程度である。

本プロジェクトでは、伊方サイトでの地震観測記録のほか、防災科学技術研究所（K-NET, KiK-net）、気象庁、港湾空港技術研究所の地震観測記録を地震動データベースとして活用した。

2.2.2. サイトに適用可能な GMPE の選定及びサイト特性の補正

GMC TI チームは伊方サイトに適用可能な GMPE の選定に際して、その抽出条件を明確に定めたうえで国内外の多数の GMPE から候補を選定した。抽出条件としては、周期範囲(0.02 秒～5.0 秒まで評価可能)、地震の種類別に評価が可能であること、近距離地震に適用が可能であること等であり、さらに参考条件として M9 クラスへの適用性などにも配慮した。

また、伊方サイトの地盤は $V_s=2.6\text{km/s}$ と極めて堅硬な岩盤であるため、選定した GMPE に対してのサイト補正を実施し、最終的な GMC モデルを構築した。なお、サイト補正に際しては、伊方サイトでの観測地震動が必ずしも多くはないためにサイト内の地震観測データに加え、地震観測記録が公開されている観測点(防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net), 気象庁及び港湾空港技術研究所)等も検討対象とした。

2.2.3. 断層モデルに関する評価

本プロジェクトにおける GMC 関連の重要な検討要素として、PSHA への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(以下、「断層モデル」という。)として特性化震源モデルの適用を挙げることができる。本プロジェクトで断層モデルを導入する背景としては、中央構造線断層帯が伊方サイトから近接して存在していることが主要因である。断層モデルを PSHA に適用するに際して、Workshop #2 では PE として Norm Abrahamson 氏を招聘して米国における断層モデルに関する検討事例に関する情報を入手した上で既往検討手法との比較・分析を行うとともに、地震動予測の中央値に関する認識論的不確実性や震源近傍で生じる地震動のばらつきについても検討を実施した。

これらの検討では、国内で確立されている地震本部による「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」を用いた特性化震源モデルによる手法と米国の Southern California Earthquake Center Broad-band Platform(SCEC BBP) で示される 6 種類の方法を用いてロジックツリーで評価すべき不確実性を定量化した。

3. SSC モデル

PSHA における SSC モデルの役割は、震源の位置、大きさ、活動の程度等を評価することである。本プロジェクトの SSC モデルでは、震源要素について前述の各震源に分けてモデル化を実施した。

第 5 図は伊方サイトとフィリピン海プレートとの位置関係を示す。伊方サイトは、フィリピン海プレートの北西への沈み込みに伴い、南海トラフで発生する大地震の想定震源域北限に位置する。本プロジェクトでは、南海トラフで繰り返し発生する地震を「南海トラフの大地震」、フィリピン海プレートで発生するその他の地震を「フィリピン海プレートの特定しにくい地震」としてモデル化を実施した。

第 6 図は伊方サイト周辺の活断層分布を示す。伊方サイトは、フィリピン海プレートの斜め沈み込みと対応して右横ずれする島弧中央断層である中央構造線断層帯の南方に位置する。本プロジェクトでは、内陸地殻内で発生する地震について、「中央構造線断層帯の地震」の他、五反田断層や F-21 断層などで発生する「その他内陸活断層の地震」、さらに「内陸活断層の固有規模より小さい地震」や内陸活断層が知られていないところで発生しうる「陸側プレートの特定しにくい地震」としてモデル化した。

モデル化の概要は以下のとおりである。

SSHAC ガイドラインにおける最も重要な概念は、不確かさの評価に際して、CBR of TDI に基づくモデルを構築することである。

SSC モデルにおける分岐の設定に際しては、バイモーダルあるいはトリモーダルな意見分布を示すような場合には、対応する数の分岐を設定することとした。また、1 つの分岐として設定した意見の中にも幅がある場合には、技術的に公平な根拠に基づいた妥当な PSHA を行う観点から、その幅の中央値を採用することを基本とした。また、SSC モデルの重みの設定に際しては、

意見分布の傾向や当該の意見分布に係る直接的、間接的データの存否、信頼性に基づいて決定し、中央値(Center)とその分布形(Body)や範囲(Range)の端を表現した。

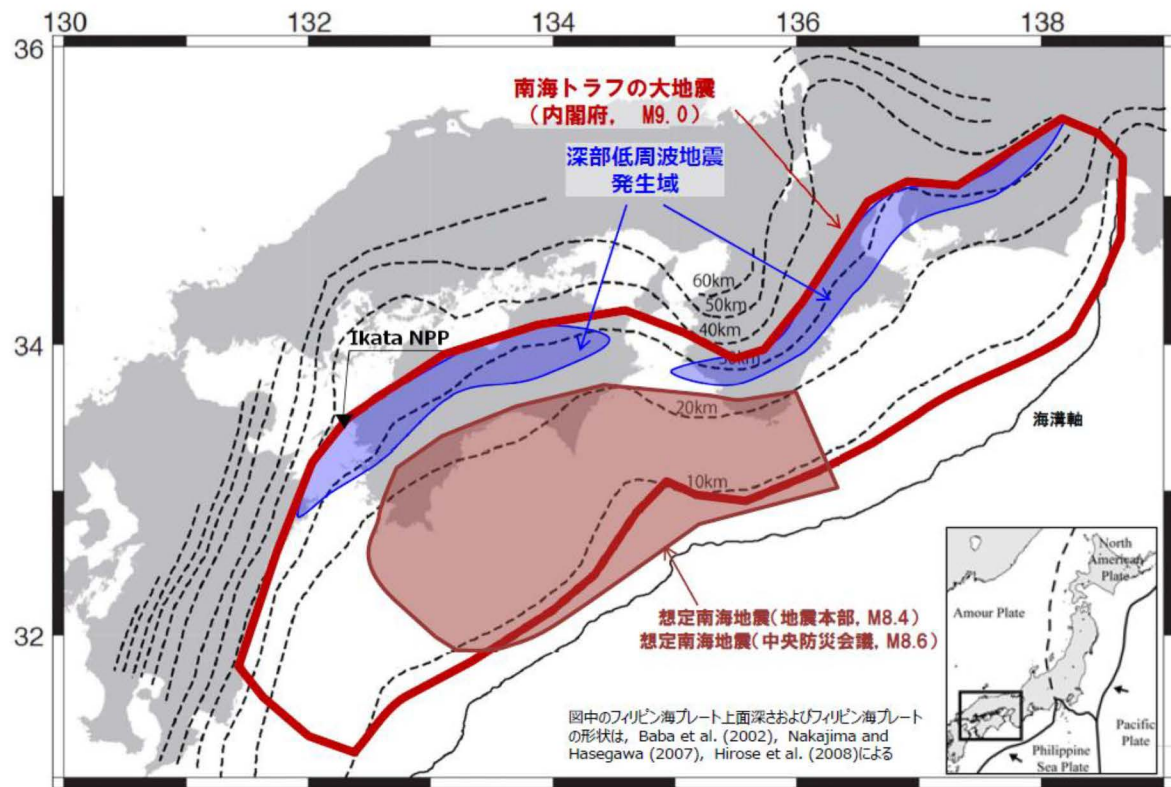
これらの基本的な考え方にに基づき、前述の各震源に対して、(a)場所(位置・形状)、(b)規模、(c)発生確率に分け(第1表)、ロジックツリーの分岐、重みを設定した。ここで、固有規模より小さい地震については、感度解析の結果、伊方サイトに最も近い中央構造線断層帯の伊予灘セグメントで発生する地震を除いて、地震ハザードへの影響がほとんどないので、伊予灘セグメントで発生する固有規模より小さい地震のみを考慮することとした。

第7図にSSCモデルに関するロジックツリーの1例として、中央構造線断層帯の地震の規模に関するロジックツリーを示す。なお、中央構造線断層帯については、古文書等に基づく歴史地震、古地震調査による活動履歴、活断層のステップ幅等の幾何形態、横ずれ変位速度や地質構造等のデータを踏まえた上で、①～⑧の8セグメントに分割し、その連動を考慮した。

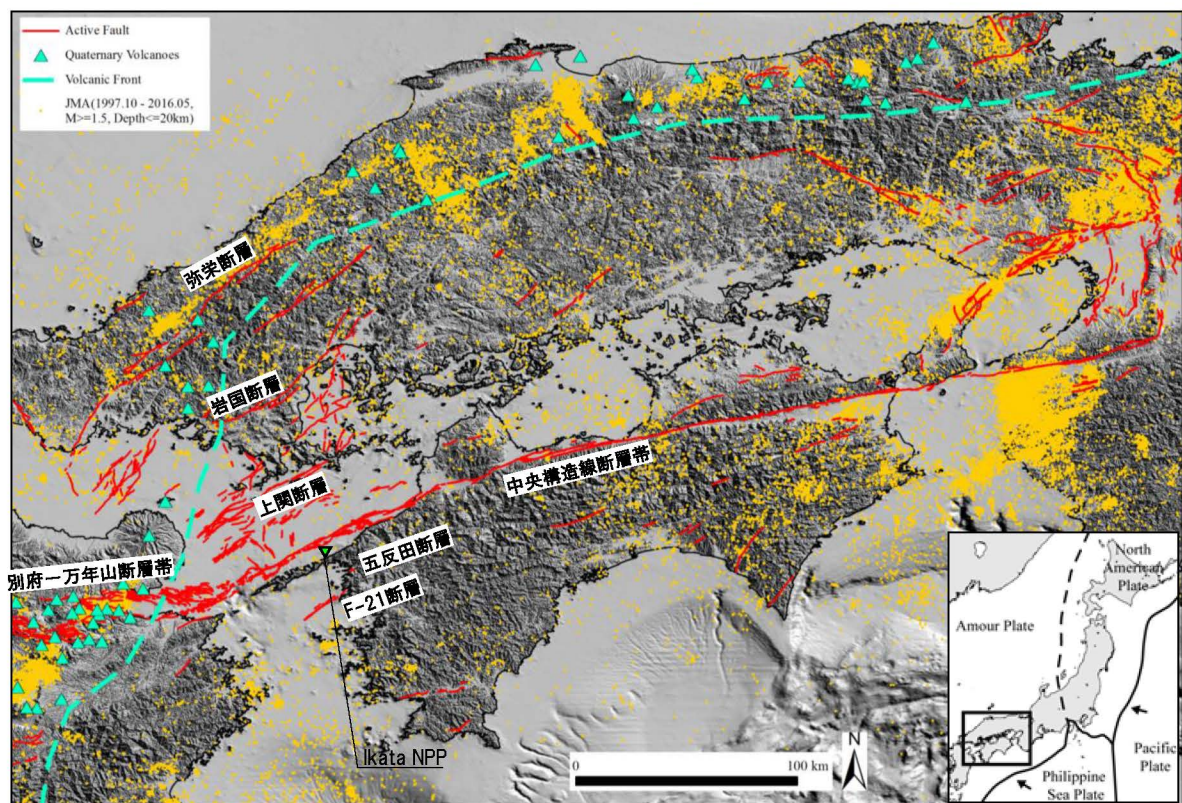
第1表 伊方サイト周辺で検討の対象とする地震タイプと評価項目ごとの
主なモデル

地震タイプ－ 評価項目ごとの 主なモデル		(a)	(b)	(c)
		場所（位置・形状）	規模	発生確率
(1)	南海トラフの 大地震	・想定震源域 ・断層面上端／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 ・確率モデル ・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 ・確率モデル
(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 ・確率モデル ・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 ・確率モデル
(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 ・確率モデル
(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 ・確率モデル

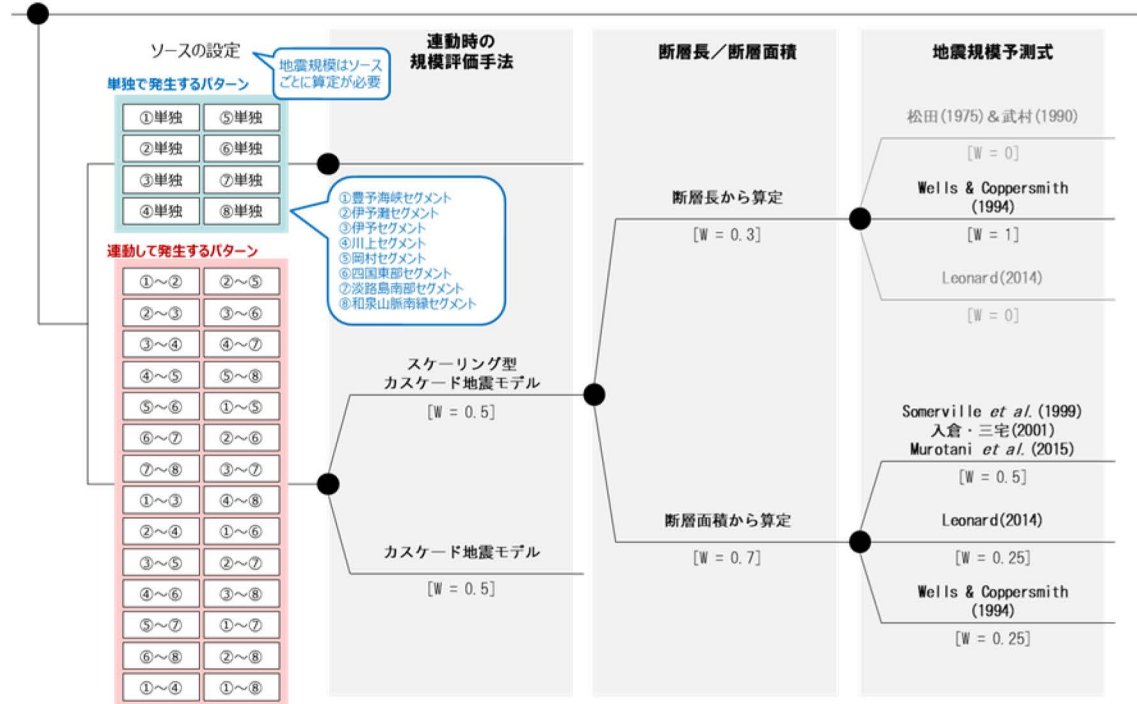
SSCのHazard Significant Issueに関わるモデル



第5図 伊方サイトとフィリピン海プレートの位置関係



第6図 伊方サイト周辺の活断層分布



第 7 図 SSC モデルのロジックツリーの例（中央構造線断層帯の規模）

4. GMC モデル

PSHA における GMC モデルの役割は、各震源からの地震動を評価することである。本プロジェクトの GMC モデルとして、震源毎（地震タイプ区分毎）に以下のとおり設定した。

- ・地震動評価手法（GMPE, 断層モデル）
- ・使用する GMPE（地震動評価手法が GMPE の場合）
- ・統計的グリーン関数法, 経験的グリーン関数法（地震動評価手法が断層モデルの場合）
- ・鉛直動と水平動の応答スペクトルの比率（以下, 「V/H スペクトル比」という。）（鉛直動の場合）
- ・中央値の不確実性
- ・ばらつきと分布形状

各震源との関係では、中央構造線断層帯に関しては、サイト近傍に位置し、感度解析の結果からもその影響が大きいと判断されたことから、地震動評価手法として、GMPE と特性化震源モデルを用いた断層モデル両方を分岐として設定した。その他に、サイト近傍に分布する孤立した短い活断層である五反田断層に関しては同様に GMPE と断層モデルの両方を分岐として設定した。これら以外の震源に関しては、GMPE のみによる地震動評価とした。

GMPE と断層モデルの重み設定については、GMPE はデータセットの範囲内における信頼性の高さが支持される一方、断層モデルは震源近傍の地震動評価への適用性の高さが支持され、両手法とも日本での適用実績が豊富であることも踏まえ、いずれも同程度に確からしいと判断して 0.5:0.5 とした。

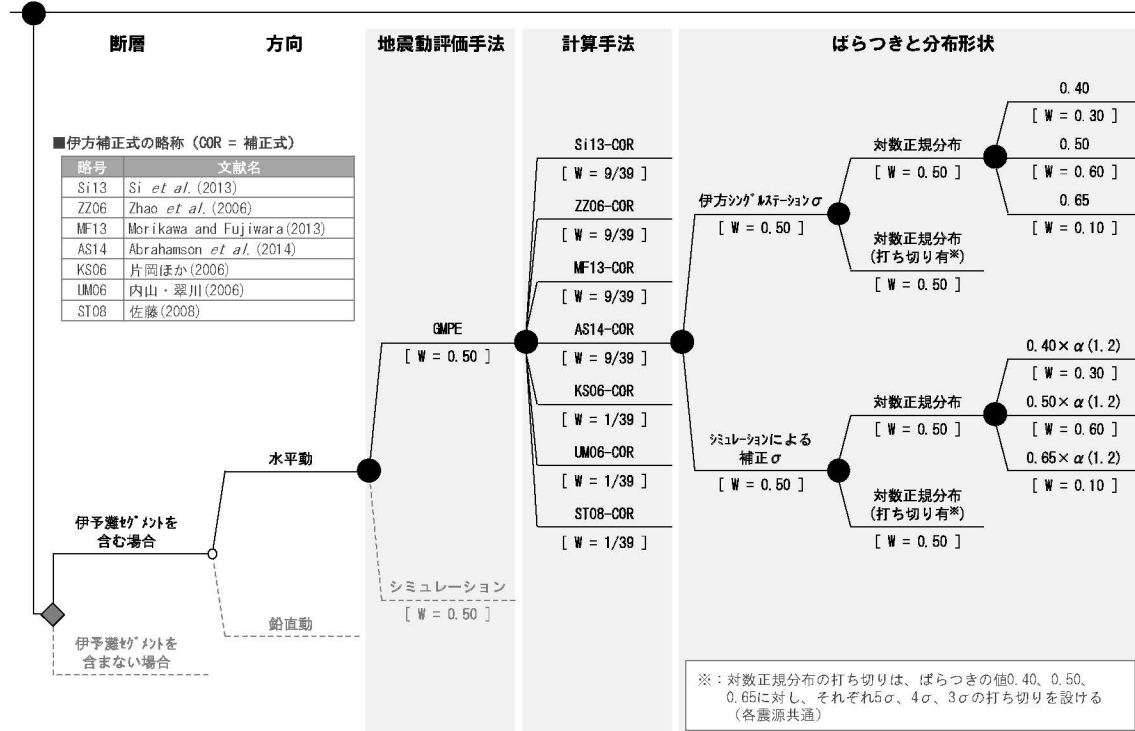
GMPE に関しては、前述の通り、明確な抽出条件で選定された国内外の GMPE に関してサイト補正を考慮した GMPE を最終的に設定した。

断層モデルに基づく地震動評価では、前述の通り、米国の SCEC BBP のモデルとの比較検討等により適切な不確実性を設定した上で、統計的グリーン関数法と経験的グリーン関数法による地震動評価を実施した。ただし、経験的グリーン関数法を用いる場合に必要となる要素地震として、伊方サイトでは適切な内陸地殻内地震の記録が得られていないため、重みは統計的グリーン関数法が 0.9、経験的グリーン関数法が 0.1 と設定した。

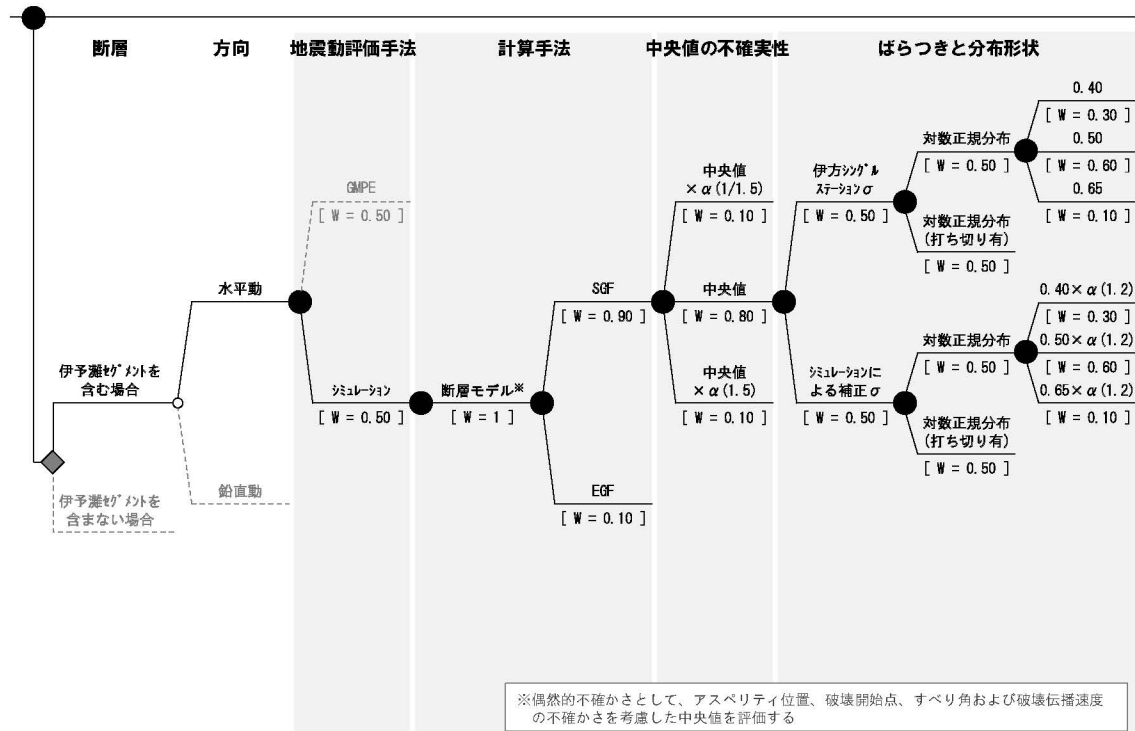
鉛直動の地震動評価については、鉛直動を直接評価できない GMPE も選定されているため、水平動に V/H スペクトル比を考慮した設定もモデル化することとし、この点に際しては、伊方サイトの地震観測記録を用いた V/H スペクトル比に加え、KiK-net の地中記録から求めた V/H スペクトル比も分岐として考慮した。

また、GMC モデルにおけるばらつきの分布形状の取り扱いとしては、地震動が有限であることから、分布形状の裾野を打ち切ることで表現する分岐についても設定した。

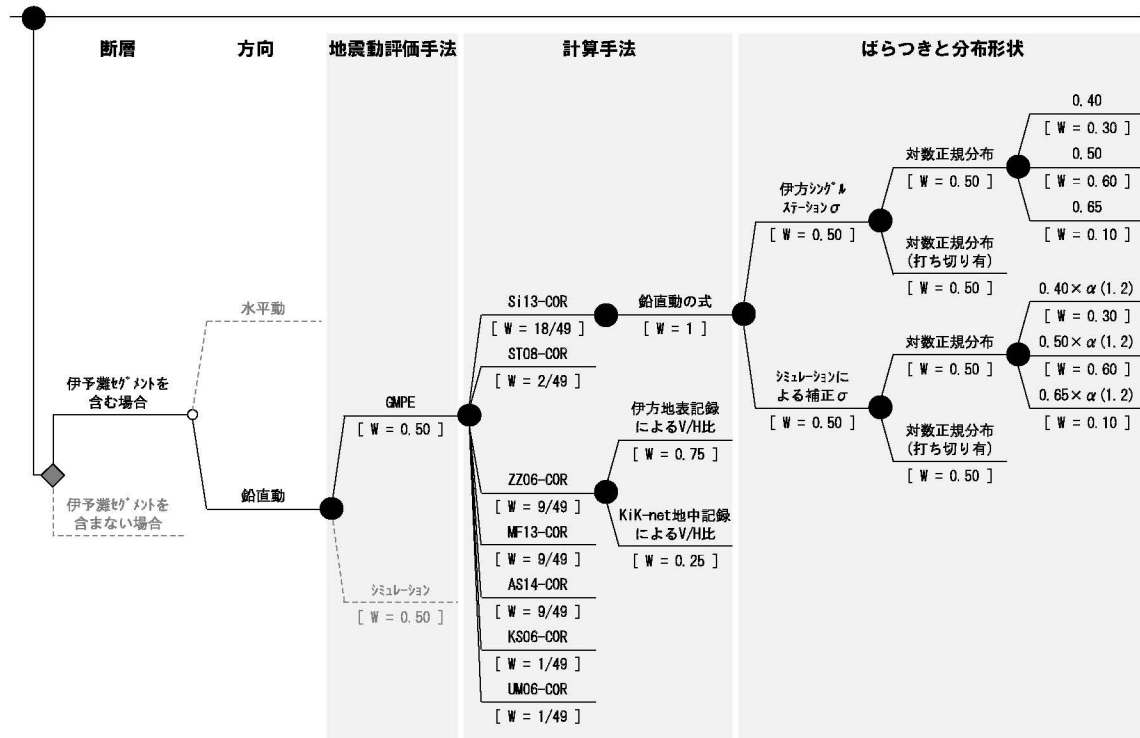
これらの考え方に従う GMC モデルのロジックツリーの例として、中央構造線断層帯のロジックツリーを第 8 図から第 10 図に示す。



第 8 図 GMC モデルのロジックツリーの例 (中央構造線断層帯：水平動 / GMPE)



第 9 図 GMC モデルのロジックツリーの例 (中央構造線断層帯：水平動 / 断層モデル)



第 10 図 GMC モデルのロジックツリーの例（中央構造線断層帯：鉛直動 / GMPE）

5. ハザード解析結果

本節では、前述した SSC モデル及び GMC モデルに基づくハザード解析結果について示す。

第 2 表に各震源のロジックツリー分岐数を示す。例えば中央構造線断層帯の地震についてはロジックツリーの分岐数が 10^5 オーダー、南海トラフの大地震については分岐数が 10^3 オーダーとなっており、単純にこれらを全震源について結合すると、水平動で 10^{25} オーダー、鉛直動で 10^{26} オーダーの分岐数と計算量が膨大になる。そこで、まず、各震源において 5%~95%の間でフラクタイルハザード曲線を算定し、それらを結合することによって全体のハザード曲線を算定することで計算量を削減した。

周期 0.02 秒における全ハザード曲線（フラクタイルハザード曲線）、一様ハザードスペクトルは各々第 11 図~第 12 図に示すとおりである。第 11 図において、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おり、 10^{-5} 以下の低頻度域において非常にハザードレベルの高い一部の分岐に全体の平均が影響を受けているためであると考えられる。第 12 図において、中央構造線断層帯の地震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。加速度レベルの小さい範囲においては、フィリピン海プレートの特定しにくい地震、南海トラフの大地震及び固有規模より小さい地震といった発生確率が相対的に大きな震源の影響が支配的となっている一方で、陸側プレートの特定しにくい地震及びその他内陸活断層の地震の影響は全体的に非常に小さい。

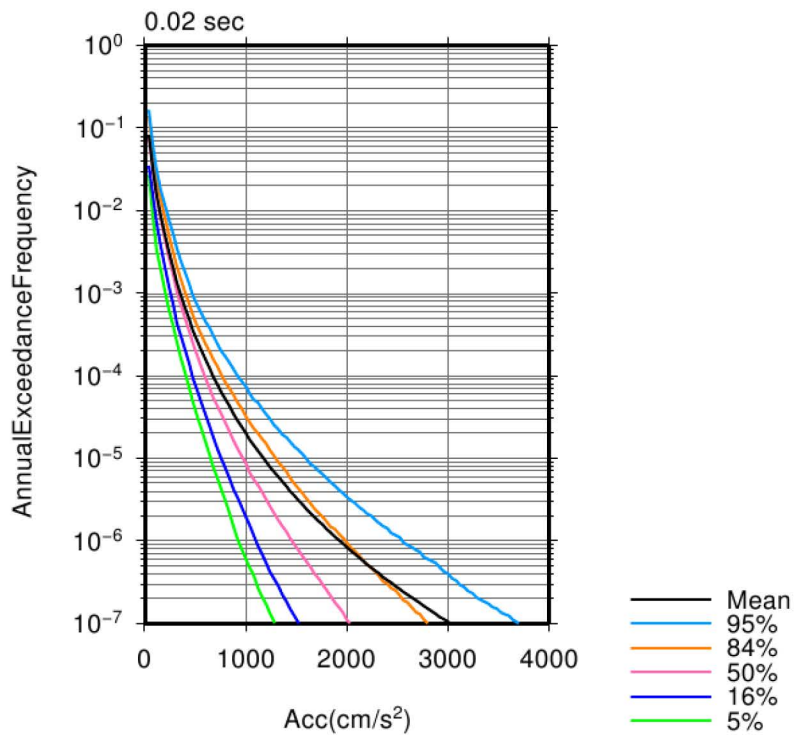
ここで、ロジックツリーの各分岐項目によるハザード解析結果への影響を全体の幅に対する割合で棒グラフによって示した Variance contribution plot をみると、中央構造線断層帯の地震（水平動、GMPE）では、発生確率の計算方法と GMPE の影響が支配的であり、SSC モデルにおいて専門家の意見

が大きく分かれる地震規模予測式や断層傾斜角の影響は小さい（第 13 図）。また、GMPE と断層モデルを比較すると、周期によって両者の大小関係は異なっているものの、加速度レベルは概ね同等である（第 14 図）。一方、南海トラフの大地震（水平動）では、GMPE の影響が最も大きく、次いで震源域の設定及び断層最短距離の算出方法の影響が大きい（第 15 図）。

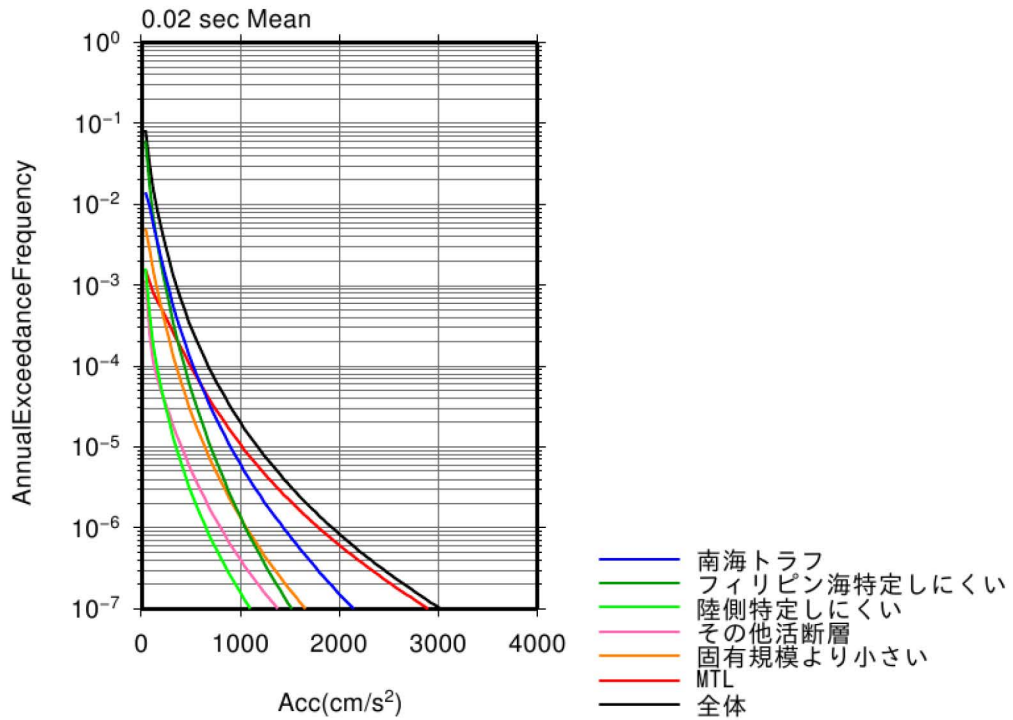
最後に、第 16 図に示す一様ハザードスペクトルから、伊方サイトにおいて数百ガルのオーダーの加速度の年超過頻度は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ であり、千ガルを超えるような大加速度の年超過頻度は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ である。

第 2 表 各震源のロジックツリーの分岐数

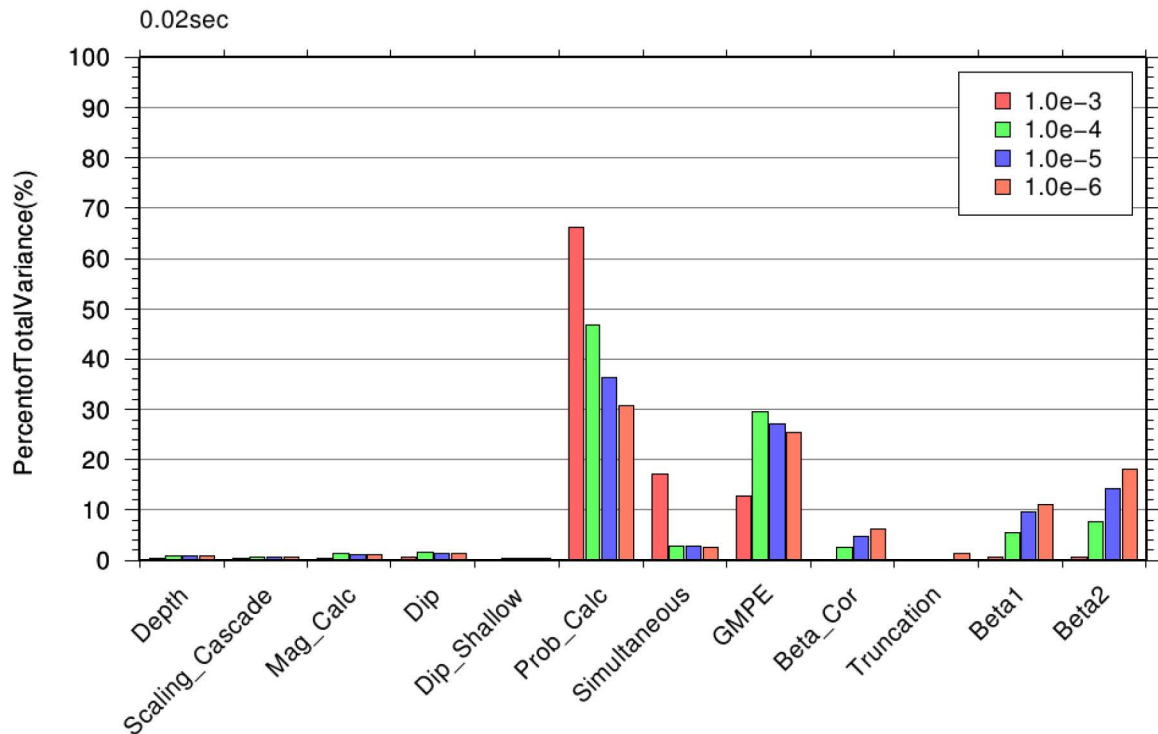
地震タイプ区分	水平	鉛直
中央構造線断層帯の地震		
伊予灘含む(GMPE)	88,704	152,064
伊予灘含む(シミュレーション)	76,032	114,048
伊予灘含む 計	164,736	266,112
伊予灘含まない	44,352	76,032
固有規模より小さい地震	84	144
その他内陸活断層の地震		
五反田断層以外	168	288
五反田断層(GMPE)	588	1,008
五反田断層(シミュレーション)	252	504
五反田断層 計	840	1,512
陸側プレートの特定しにくい地震	672	1,152
フィリピン海プレートの特定しにくい地震	336	336
南海トラフの大地震	1,512	1,512
合計	2.96E+25	7.43E+26



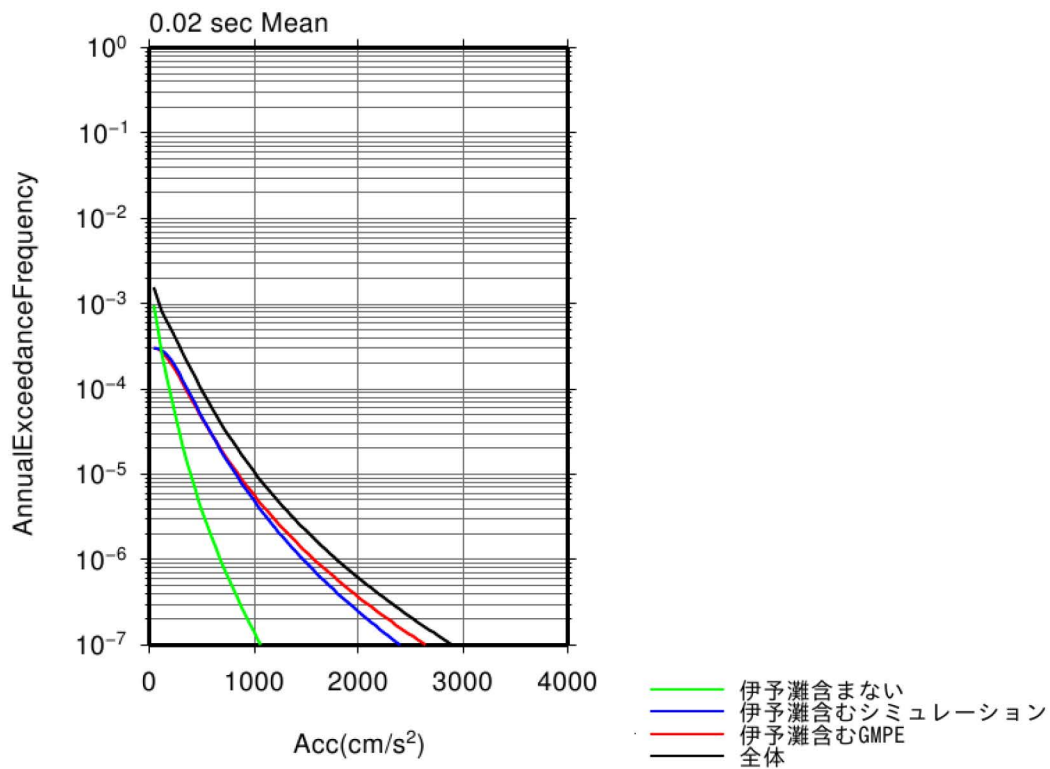
第 11 図 最終ハザード曲線（水平動/周期 0.02 秒）



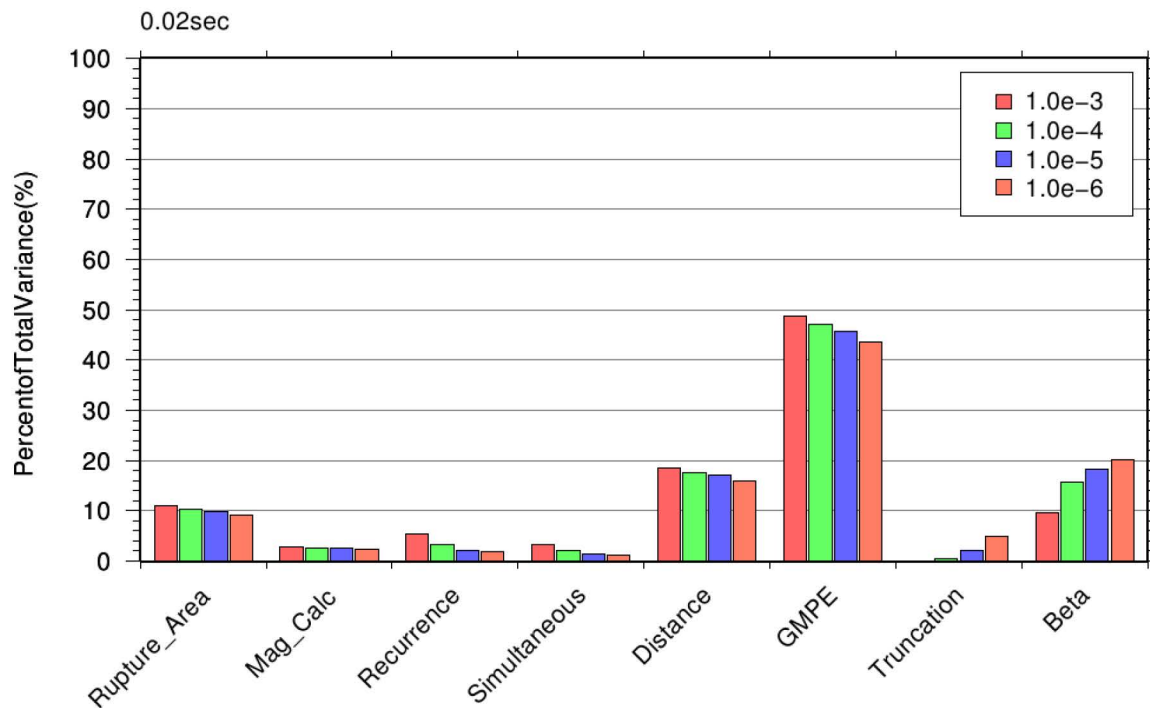
第 12 図 震源別のハザード曲線（水平動/周期 0.02 秒）



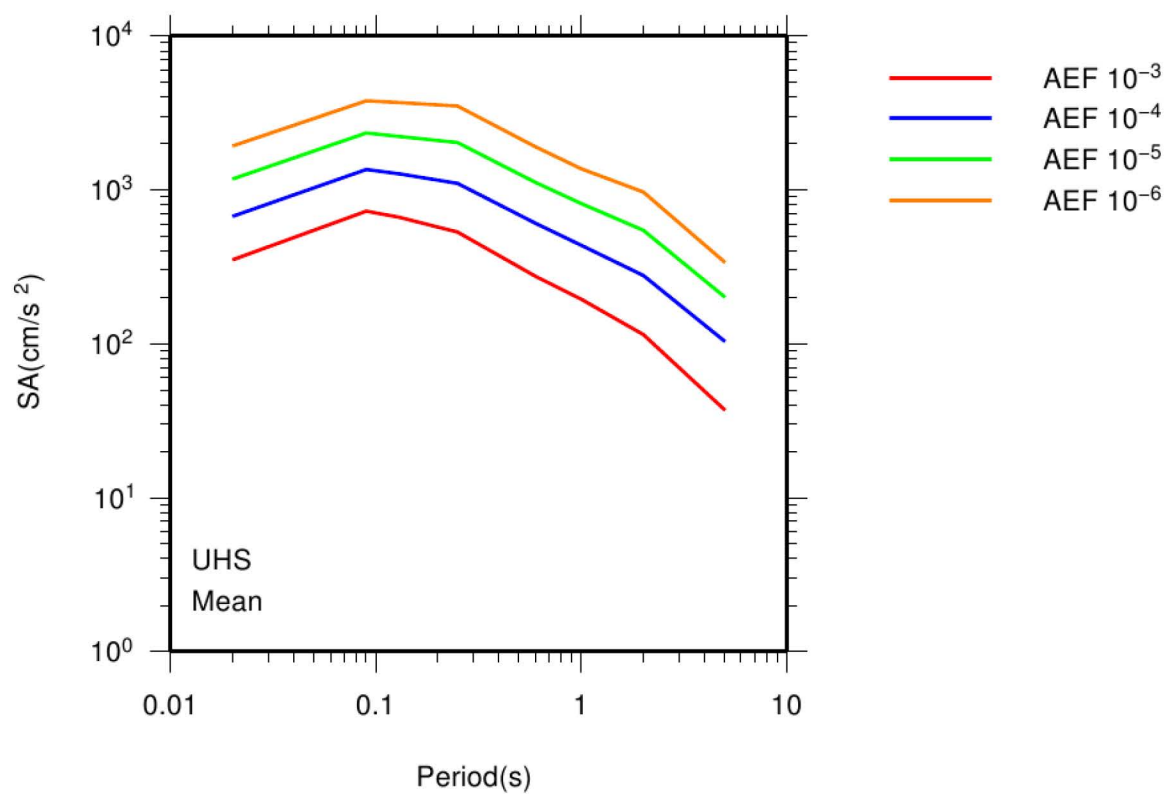
第 13 図 中央構造線断層帯の地震の Variance contribution plot（水平動/周期 0.02 秒，GMPE）



第 14 図 中央構造線断層帯の地震の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/周期 0.02 秒，平均値）



第 15 図 南海トラフの大地震の Variance contribution plot（水平動/周期 0.02 秒）



第 16 図 一様ハザードスペクトル (水平動)

6. 結論

冒頭で述べた通り、本プロジェクトの到達点は、我が国で初めて SSHAC Level 3 による PSHA を実施することであり、本プロジェクトの当初からプロジェクト期間を通じ、一貫して全ての検討手順は SSHAC Level 3 に適合するように実施された。

具体的には、本プロジェクトの体制、各参加者の役割と責任、検討項目及び検討手順、PPRP によるレビュー内容及び文書化の全ての内容は、SSHAC ガイドラインに適合するように実施された。

伊方サイト周辺の地震テクトニクスは、南方から沈み込む海洋プレートと島弧中央断層によって特徴付けられ、プレート境界のメガスラストで発生する地震、海洋プレート内地震、長大横ずれ断層による連動型地震、内陸活断層で発生する固有規模より小さい地震、孤立した短い活断層による地震、活断層が特定されていない場所で発生する内陸型地震といった各種の地震が発生しうる。このように多様な震源に対して、SSHAC Level 3 に適合するように CBR of TDI を達成しつつロジックツリーを構築した結果、その分岐数は国内で過去に例のないほど膨大なものとなった。また、SSC モデルにおける長大断層の連動性評価や GMC モデルにおける断層モデルと米国 SCEC BBP との比較検討などは先駆的な取り組みであり、後続のプロジェクトにおいても大いに参考となる成果を含む。

一様ハザードスペクトルから、伊方サイト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 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ であり、このハザード解析結果に基づき、今後、PRA やその結果に基づく RIDM に繋げることが可能である。ここで、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おり、 10^{-5} 以下の低頻度域において非常にハザードレベルの高い一部の分岐が平均ハザードに

影響を及ぼしていることを表している。その主要因として、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て複数の GMPE を採用した結果、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評価されていることが挙げられる。Next Generation Attenuation(NGA)-West 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。このような知見を踏まえれば、PSHA の更なる高度化に向けた今後の課題としては、国内において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。

以上の通り、本プロジェクトでは、自然外部事象の評価では不可欠となる不確かさの評価に関して、SSHAC Level 3 で PSHA を実施することによって、客観化と定量化を実現できた。ここで得られた各種の知見については、本報告書で詳細に記述した地震学・地震工学的見地から、水平展開されるべきものであることに加え、不確かさを的確かつ客観的に評価するという観点から、後続の PSHA に展開されるべき意義深いものといえる。

< 謝辞 >

伊方 SSHAC カタログには気象庁一元化震源，地震動データベースには防災科学技術研究所（K-NET，KiK-net），気象庁，港湾空港技術研究所の地震観測記録を使用させて頂いた。Workshop #1 及び Workshop #2 では，RE あるいは PE として延べ 52 名の外部専門家に貴重な講演と議論を頂き，その講演資料をモデル構築のためのデータベースとして活用させて頂いた。野村俊一氏には Workshop #2 で PE として講演頂いた後，中央構造線断層帯の活動間隔のばらつきを算定頂き，その結果を SSC モデルに採用させて頂いた。PPRP 議長を務めた入倉孝次郎氏をはじめ，岡田篤正氏，安中正氏，宇賀田健氏，Martin McCann 氏の 5 名には，PPRP として，プロジェクト全体に亘って SSHAC Level 3 での要求に従っていることを保証する上で必要なコメントを頂くとともに，最終報告書原稿に対して丁寧かつ適切なレビューを頂いた。

SSHAC の経験を有する Advisor として参画頂いた George Apostolakis 氏と Kevin Coppersmith 氏にはプロジェクトの全体に亘って手順と技術の両面から有益な助言を頂いた。

以上の方々に，ここに記して深く謝意を表する。