高浜3·4号と大飯3·4号の基準地震動は過小評価されている

2015年10月1日

大阪府立大学名誉教授

長沢 啓行

[要旨]

関西電力の高浜原発 3·4 号では 2015 年 4 月 14 日，福井地裁が運転差止仮処分命令を決定し，九州電力の川内 1·2 号では同年 4 月 22 日，鹿児島地裁が運転差止仮処分申請を却下した．高浜決定は，「具体的危険性が万が一でもあれば差し止めが認められる」とした大飯 3·4 号運転差止判決（2014 年 5 月 21 日）を受け継ぎ，基準地震動の過小評価を第一の問題点として指摘した．川内決定においても,「基準地震動は，原子力発電所の敷地において今後発生し得る最大の地震を想定して策定すべき」としており,「策定された基準地震動が十分保守的であるかどうか」が最大の争点になっている．

そこで，本意見書では，高浜 3·4 号および大飯 3·4 号のいずれの基準地震動においても，最新の知見が十分反映されておらず，保守性（安全余裕）を十分持たせたものになっていないことを示す．基準地震動は「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」で構成されるため，それぞれについて次の点を明らかにした．

（１）「震源を特定せず策定する地震動」として，「2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」が採用されている．ところが，この留萌支庁南部地震においては，地震計の設置不足を補うため，地域地盤環境研究所が震源断層モデルを用いて地震観測点以外の震源域内での地震動を再現解析しており，その最大値は地震観測記録の 1.8 倍になる．これを考慮すれば，留萌支庁南部地震を考慮した地震動は 1,100 ガル程度になり，高浜 3·4 号のクリフエッジ 973 ガルを超える．さらに，原子力安全基盤機構（現在は原子力規制庁）は国内の地震観測記録を反映した独自の断層モデルによる地震動解析を行い，M6.5 の横ずれ断層で 1,340 ガルの地震動が起こることを明らかにしている．これを採用すれば，高浜 3·4 号だけでなく，大飯 3·4 号のクリフエッジ 1,260 ガルをも超える．

（２）「震源を特定して策定する地震動」は，基本的に「FO-A～FO-B～熊川断層」の地震動評価に基づいている．高浜 3·4 号で 700 ガルの基準地震動 Ss-1 を規定しているのは耐専スペクトルによる地震動評価だが，最近 20 年間の震源近傍での地震観測記録は反映されておらず，現在見直し作業中であり，改定後の耐専スペクトルを用いるべきである．また，耐専スペクトルは平均的な応答スペクトルにすぎず，地域差以外の偶然変動によるバラツキをも考慮すれば，少なくとも 2 倍の余裕を持たせるべきである．そうすれば 1,300 ガル以上になり，クリフエッジを超える．高浜 3·4 号における断層モデルによる評価は耐専スペクトルによる評価の 1/2 以下と小さく，明らかに過小評価であり，断層モデルの欠陥を示唆している．

大飯 3·4 号では，断層との距離が近すぎるという理由で耐専スペクトルは適用されていないが，関西電力の示した耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係図から 1,200 ガル以上になる．また，大飯 3·4 号と高浜 3·4 号の断層モデルによる地震動評価には 2 倍の差があり，大飯 3·4 号で耐専スペクトルが適用されれば，高浜 3·4 号における 700 ガル弱の 2 倍になって当然であり,「適用外」とする根拠に乏しいことを示唆している．さらに，耐専スペクトルにおける偶然変動などの少なくとも 2 倍のバラツキを考慮すれば 2,400 ガル以上になる可能性もある．これは，原子力安全基盤機構の独自の断層モデルによる地震動解析結果とも一致しており，2008 年岩手・宮城内陸地震の地中地震計による 1,078 ガル（3 成分合成，基準地震動と同じ解放基盤表面はぎとり波相当で 2,000 ガル）の地震観測記録等とも整合している．

つまり,「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」のいずれにおいても地震動が過小評価されており，最新の知見に基づいて基準地震動を保守的に設定し直せば，高浜 3·4 号と大飯 3·4 号のいずれにおいてもクリフエッジを超えることは避けられない．

1　はじめに

関西電力の高浜原発 3·4 号では 2015 年 4 月 14 日，福井地裁が運転差止仮処分命令を決定し [42]，九州電力の川内 1·2 号では 2015 年 4 月 22 日，鹿児島地裁が運転差止仮処分申請を却下した [43]．福井地裁の決定は，2014 年 5 月 21 日の大飯 3·4 号運転差止判決 [44] と同様に，「具体的危険性が万が一でもあれば差し止めが認められる」(主文 [44] pp.40-41, 主文 [42]p.45) という観点から，「本件原発の安全施設，安全技術には多方面にわたる脆弱性がある」と具体的に指摘し，「①基準地震動の策定基準を見直し，基準地震動を大幅に引き上げ，それに応じた根本的な耐震工事を実施する」(主文 [42]p.44) ことを第一に求めている．仮処分申請を却下した川内決定においても，「新規制基準の趣旨に照らせば，基準地震動は，原子力発電所の敷地において今後発生し得る最大の地震を想定して策定すべきものであると解される.」(主文 [43]pp.127-128) としており，「策定された基準地震動が十分保守的であるかどうか」が最大の争点になっていると言える．

そこで，本意見書では，高浜 3·4 号および大飯 3·4 号のいずれの基準地震動においても，最新の知見が十分反映されておらず，保守性（安全余裕）を十分持たせたものになっていないことを理論的かつ具体的に示す．

基準地震動は，「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」の 2 種類で構成されるため，それぞれについて検討する．前者は，地表の活断層を詳細に調査し，地下の震源断層を特定して地震動評価を行うものであり，耐専スペクトルや距離減衰式などを用いた「応答スペクトルによる方法」と，震源断層モデルによるコンピュータ・シミュレーションである「断層モデルによる方法」の 2 種類の手法で行われる．後者は，詳細な活断層調査を行っても事前には予知できない震源断層による地震動の評価を行うものであり，16 の地震観測記録の採否をサイトごとに検討するものとされている．

以下では，わかりやすさの観点から，まず「震源を特定せず策定する地震動」を取り上げ，「2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」について，地震計による地震観測記録の時間的・空間的な不足を「再現された震源断層モデル」による地震動解析で補えば，1.8 倍の 1,100 ガル程度になり，高浜 3·4 号のクリフエッジ 973 ガルを超えることを示す．さらに，国内の地震観測記録を反映した原子力安全基盤機構による独自の断層モデルによれば，M6.5 の横ずれ断層で 1,340 ガルの地震動が起こると解析されており，これを採用すれば，高浜 3·4 号のクリフエッジだけでなく大飯 3·4 号のクリフエッジ 1,260 ガルをも超えることを示す．

次に，「震源を特定して策定する地震動」を取り上げ，高浜 3·4 号では「FO-A～FO-B～熊川断層」の耐専スペクトルが基準地震動を規定していること，しかし，耐専スペクトルには最近 20 年間の震源近傍での地震観測記録は反映されておらず，現在見直し作業中であり，改定後の耐専スペクトルを用いるべきであること，また，耐専スペクトルは平均的な応答スペクトルにすぎず，地域差以外の偶然変動によるバラツキをも考慮すれば少なくとも 2 倍の余裕を持たせ，1,300 ガル以上へ引上げるべきであることを示す．

また，高浜 3·4 号における断層モデルによる評価は耐専スペクトルによる評価の 1/2 以下と小さく，明らかに過小評価であり，断層モデルの欠陥を示唆していることを示し，理論的にも裏付ける．

大飯 3·4 号においては，断層との距離が近すぎるという理由で耐専スペクトルは適用されていないが，関西電力の示した耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係図から 1,200 ガル以上になることを示し，大飯 3·4 号と高浜 3·4 号の断層モデルによる地震動評価に 2 倍の差があることから耐専スペクトルも高浜 3·4 号における 700 ガル弱のほぼ 2 倍の 1,200 ガル以上になって当然であることを示す．さらに，耐専スペクトルにおける少なくとも 2 倍の偶然変動などのバラツキを考慮すれば 2,400 ガル以上になる可能性があること，しかも，これらは地震観測記録など最新の知見にも合致することを指摘する．

以上より，最新の知見に基づき基準地震動の過小評価を改めれば，高浜 3·4 号と大飯 3·4 号のいずれにおいてもクリフエッジを超えることは避けられないことを指摘する．

2　震源を特定せず策定する地震動

関西電力は高浜・大飯・美浜原発の基準地震動を過小評価し続けてきた．表 1 のように，原子炉設置許可時の基準地震動はそれぞれ 370 ガル，405 ガル，405 ガルにすぎなかった．1995 年の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災の惨禍を受けて原子力安全委員会の耐震設計審査指針の見直しが進み，2006 年の指針改定では原子力ムラにだけ通用していた独善的な活断層評価手法はことごとく退けられた．その結果，活断層は図 1 のように一挙に数が増え，それぞれが長くなり，連動も考慮され，2008 年のバックチェック中間報告，2010 年の原子力安全・保安院報告，2013 年以降の原子力規制委員会審議と，検討を経るにつれ，基準地震動が引上げられていった．高浜 3·4 号では，370 ガルから 700 ガルへ 1.9 倍，大飯 3·4 では 405 ガルから 700 ガル（856 ガルの地震波追加）へ 1.7 倍になった．

しかし，活断層評価手法は改善されたものの，地震動評価手法が古いままであったり，地震動を過小算定する方法がそのまま用いられたり，せっかく得られた地震観測記録や地震動解析結果など最新の知見が生かされなかったり，問題だらけである．原子力規制委員会・原子力規制庁は，市民との話合いの中で地震動過小評価の問題点を色々指摘され，それを部分的に認めながら，改めようとしていない [46, 47, 48, 49, 50]．ところが，原子力規制委員会の委員長代理として地震動評価の審議を担ってきた島崎邦彦氏は，任期切れで退職して 8ヶ月後の 2015 年 5 月の学会で，今の断層モデルのレシピでは地震動が過小評価されることを自ら発表し，批判している [36]．自らが審査の中で認めた地震動評価手法を自ら批判せざるを得なかったのは，学者としての良心の現われであろう．行政の責任ある立場にあっては「当然のことを当然のごとくには主張できない」という相当のプレッシャーがあったのではないかと推測されるが，これが原子力規制委員会での審査会合の現実なのである.「行政による瑕疵の有無」を判断すべき司法はこの事実を良く認識しておくべきではなかろうか.

2015 年 9 月現在，原子力規制委員会の審査会合で了承された高浜 3·4 号の基準地震動 Ss-1～7 は図 2 と表 2，大飯 3·4 号の基準地震動 Ss-1～19 は図 3 と表 3 の通りである．図 2 と図 3 には黒点線でそれぞれのクリフエッジ（炉心溶融事故に至るギリギリの地震動，表 1 参照）を加筆している．また，図中の赤い波線は，後述する原子力安全基盤機構 JNES による M6.5 の横ずれ断層の地震動（震源域内応答スペクトルの最大値の包絡線）である．

「震源を特定せず策定する地震動」は，古くは「M6.5 の直下地震」が全国一律に採用されていたが，2006 年指針改定で地震観測記録に基づく加藤ら (2004)[23] の「上限レベル」の応答スペクトルに変更され，原子力規制委員会による 2013 年以降の新規制基準の下では，震源を特定しにくい 16 の国内地震観測記録についてサイトごとに採用するかどうかを検討することになった．その結果，高浜 3·4 号と大飯 3·4 では，いずれも，表 2 と表 3 に示される「2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録」と「2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」が採用されている．

しかし，ここには 2 つの大きな問題点がある．第 1 に，震源近傍での地震観測記録がとれ始めたのは，1995 年阪神・淡路大震災を機に地震観測網が張り巡らされて以降のことであり，16 の地震観測記録は 1996～2013 年の 20 年足らずに取れたものにすぎず，データが揃うには今後何十年もかかる．サイトごとの地域性に見合った場所で地震が起きるとは限らず，地震が起きても震源域内に地震計があるとは限らない.「地震観測記録が新たにとれれば採用する」という悠長な姿勢では,「震源を特定せず策定する地震動」を保守的に考慮したとは到底言えない．

第 2 に，地震観測記録の不足を補う上で信頼性の高い地震動解析手法が開発されてきているにもかかわらず，その成果が全く生かされていない．この点で，地域地盤環境研究所 [3] と原子力安全基盤機構 JNES[9] による地震動解析結果が重要となる．

地域地盤環境研究所は北海道留萌支庁南部地震の再現モデルを構築し，これをそのまま用いて，断層最短距離 15km 以内の仮想地表観測点での地震動を解析した．これは地震計の設置不足を補う解析と言える．この地震では HKD020 地点（図 4 の△）の地表地震計で 1,127 ガル (EW 方向)，536 ガ

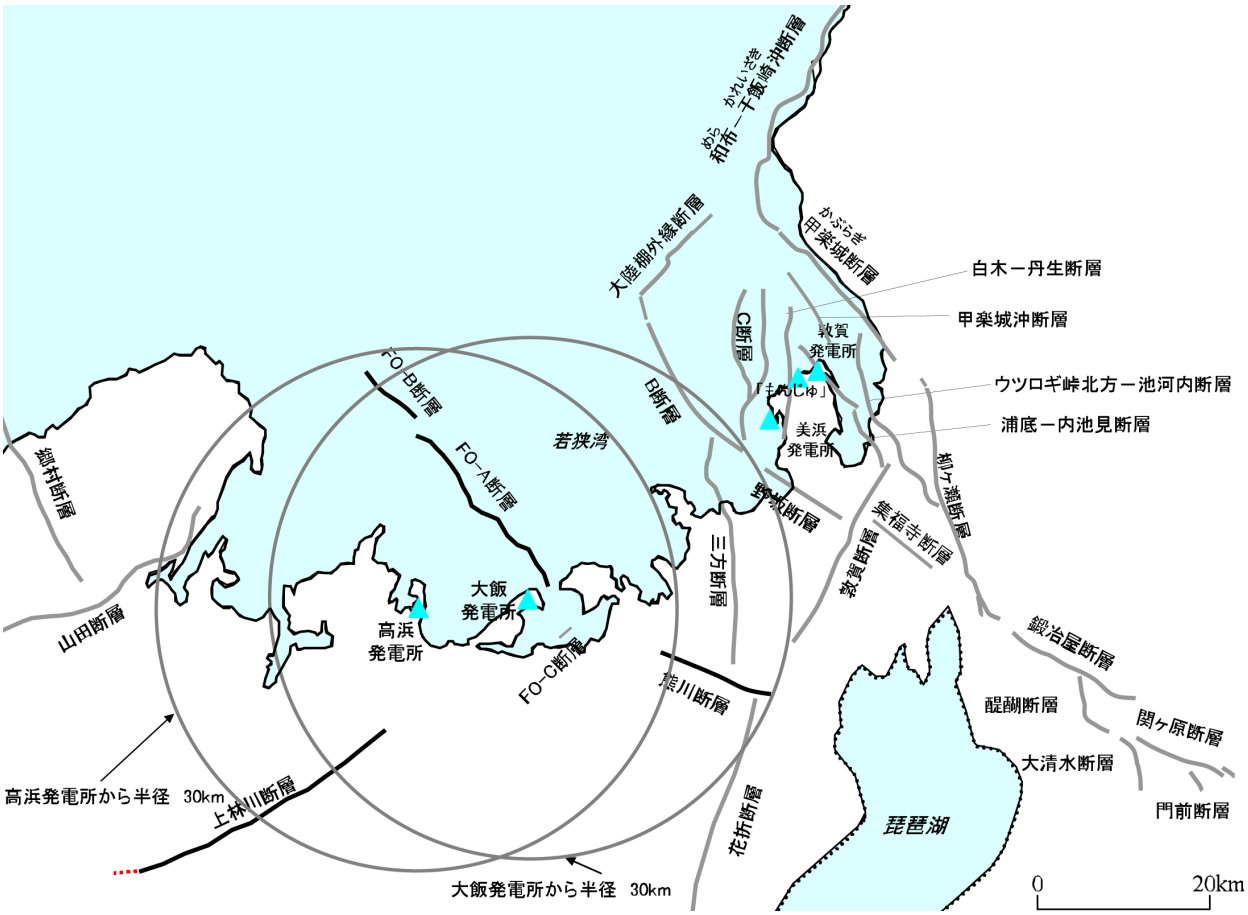


図 1: 若狭湾周辺と大飯・高浜原発 30km 圏の活断層群 [26]

表 1: 各原発の解放基盤表面位置，せん断波速度および基準地震動の水平動 (鉛直動) の最大加速度の推移

原発名	解放基盤表面位置, S 波速度 EL., V_s (注 1)	設置許可時限界地震の基準地震動 S_2	2008 年 3 月中間報告 基準地震動 Ss	2010 年原子力安全・保安院報告 Ss (注 2)	クリフエッジ [炉心溶融事故] αSs (注 3)	2015 年 9 月 原子力規制委員会審議会 Ss (注 4)
もんじゅ	+8.5m, 1900m/s	466 gal	600 (400) gal	760 (507) gal	未評価	未申請
敦賀原発	−10m, 1600m/s	532 gal	650 (433) gal	800 (533) gal	1.77Ss(1,420)	未申請
美浜原発	−10m, 1650m/s	405 gal	600 (400) gal	750 (500) gal	1.76Ss(1,320)	750(500), 993
大飯原発	+3.9m, 2240m/s	405 gal	600 (400) gal	700 (467) gal	1.80Ss(1,260)	700(468), 856
高浜原発	+1.0m, 2240m/s	370 gal	550 (367) gal	550 (367) gal	1.77Ss(973)	700 (467)

注 1 : 美浜は 1 号 EL.−14.0m, 2 号 EL.−15.5m, 3 号 EL.+1.0m の平均，大飯は 1·2 号 EL.+3.9m, 3·4 号 EL.+6.0m の平均，高浜は 1·2 号 EL.+1.0m, 3·4 号 EL.+1.5m の平均である（EL : 標高）(gal = cm/s^2)

注 2 : 2010 年に原子力安全・保安院報告が出されたのは，もんじゅ（3 月 15 日に最終報告)，美浜 1 号，大飯 3·4 号および高浜 3·4 号 (11 月 29 日に中間報告への評価結果のみ) であり，敦賀原発については 2009 年 11 月段階で審議中のままに留まっている．2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による福島第一原発事故の後のストレステストではこれらの基準地震動をベースにクリフエッジが評価されている．Ss の最大加速度は「水平方向（鉛直方向)」で記載している．

注 3 : クリフエッジとは地震動が基準地震動 Ss の何倍を超えると炉心溶融事故に至るかを示すもので，αSs で表し，その最大加速度 (Ss の最大加速度の α 倍 : 水平方向) を括弧内に記載．大飯 3·4 号ではストレステスト (一次評価) 評価結果が 2012.2.13 に原子力安全・保安院から出ており，1.80Ss と評価されている．その 7ヶ月後の 2012.9.3 に高浜 3·4 号の評価結果が出て，1.77Ss とされている．原子力安全・保安院によって評価結果が出ているのは，伊方 3 号 (2012.3.26) の 1.5Ss(855gal)，川内 1·2 号 (2012.9.3) の 1 号 1.86Ss(1,004gal)，2 号 1.89Ss(1,020gal)，泊 1·2 号 (2012.9.3) の 1.86Ss(1,023gal) の計 9 基だけである．美浜原発では 3 号について関西電力の一次評価結果 (2011.12.21) で 1.76Ss，敦賀原発では 2 号について日本原子力発電の一次評価結果 (2012.4.19) で 1.77Ss であり，これらについては原子力安全・保安院が「評価中」の段階で解散している．ちなみに，原子力安全・保安院の評価結果の出た 9 基のうち原子力安全委員会の確認を終了したのは大飯 3·4 号だけであり，伊方 3 号が 2012.3.26 に原子力安全委員会へ報告されたに留まり，他の 6 基は報告すらされていない．

注 4 : FO-A〜FO-B〜熊川断層の地震動評価において，高浜原発では耐専スペクトルが基準地震動を超えたため，水平 700(鉛直 467)gal へ引き上げた．大飯原発では耐専スペクトルが適用外になり，Ss-1 はそのままだが，断層モデルによる地震動評価で 856 ガル（EW 方向）になった（基準地震動に追加）．美浜 3 号では，大陸棚外縁〜B〜野坂断層の耐専スペクトルが適用外で Ss-1 は変わらず，断層モデルによる C 断層の地震動評価結果が 993 ガルになった（基準地震動に追加）．

表 2: 高浜 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal]（cm/s^2 と同じ）[27]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動（耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成）				
Ss-1	設計用模擬地震波 （FO-A～FO-B 断層～熊川断層（傾斜角 75 度ケース）の耐専スペクトルによる）	700		467
震源を特定して策定する地震動（「断層モデルによる方法」で作成）				
Ss-2	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 5）	376	248	334
Ss-3	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 6）	396	240	313
Ss-4	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（$V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 9）	255	205	218
Ss-5	上林川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 3）	180	374	320
震源を特定せず策定する地震動（地震観測記録等に基づいて作成）				
Ss-6	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-7	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620		320

表 3: 大飯 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal]（cm/s^2 と同じ）[28]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動（距離減衰式など「応答スペクトルによる方法」で作成）				
Ss-1	設計用模擬地震波 （FO-A～FO-B 断層～熊川断層の耐専スペクトルは適用外であり，距離減衰式による地震動評価に基づく）	700		468 *1
震源を特定して策定する地震動（「断層モデルによる方法」で作成）				
Ss-2	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 1）	690	776	583
Ss-3	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 2）	496	826	383
Ss-4	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 3）	546	856	518
Ss-5	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 4）	511	653	451
Ss-6	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 5）	660	578	450
Ss-7	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（短周期 1.5 倍ケース，破壊開始点 8）	442	745	373
Ss-8	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（傾斜角 75 度ケース，破壊開始点 1）	434	555	349
Ss-9	FO-A～FO-B 断層～熊川断層（すべり角 30 度ケース，破壊開始点 3）	489	595	291
Ss-10	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 1）	511	762	361
Ss-11	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 3）	658	727	469
Ss-12	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 4）	495	546	334
Ss-13	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 5）	744	694	380
Ss-14	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 6）	723	630	613
Ss-15	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 7）	685	728	430
Ss-16	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 8）	677	753	391
Ss-17	同上 （短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース，破壊開始点 9）	594	607	436
震源を特定せず策定する地震動（地震観測記録等に基づいて作成）				
Ss-18	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-19	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620		320

*1 : 基準地震動の応答スペクトルでは 467gal（周期 0.02 秒の応答加速度）だが，これに適合するように作成した模擬地震波の最大加速度は 468gal になるため，関西電力は 468 ガルを Ss-1 の模擬地震波の最大加速度として記載している．

表 2 と表 3 を比較して明らかなように，基準地震動 Ss-1 はいずれも同じだが，大飯 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2～17 は高浜 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2～4 の 2 倍以上である．同じ「FO-A～FO-B 断層～熊川断層」に対する評価でありながら，このように大きいのは，断層との等価震源距離が高浜 3・4 号の 18.6km に対し，大飯 3・4 号は 11.0km と非常に近いからである．だとすれば，応答スペクトルによる基準地震動 Ss-1 が大飯 3・4 号では 2 倍以上にも大きく設定されて当然である．しかし，そうなっていないのは，断層との等価震源距離が「極近距離」より近すぎると耐専スペクトルの適用範囲外になるという理由からだが，震源近傍の地震観測記録はここ 20 年でかなり多く取れだしており，これらに基づいて耐専スペクトルを抜本的に作り替えて適用すべきである．ちなみに，原子力規制庁によれば，日本電気協会で耐専スペクトルを現在見直し作業中とのことである．そうであればなおさら，参考値としてでも耐専スペクトルを求め，大飯 3・4 号の基準地震動 Ss-1 を大幅に引上げるべきである．その上で，バラツキを考慮すべきである．

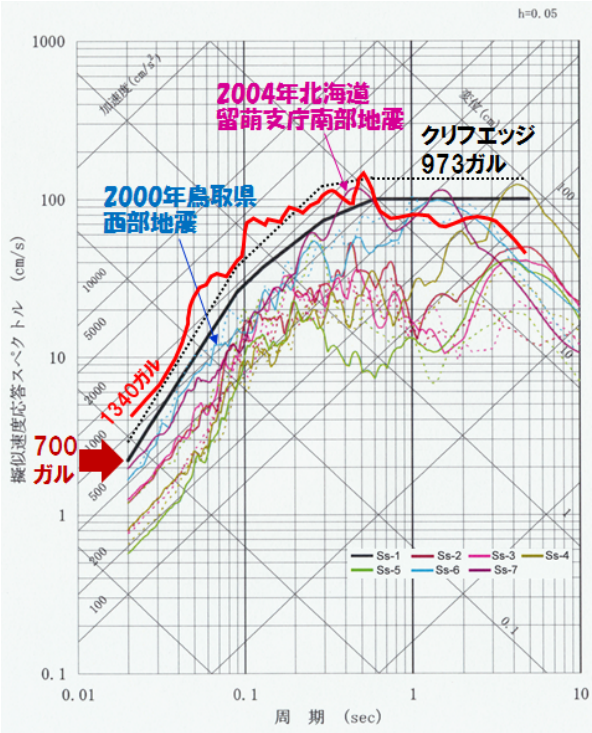


図 2: 高浜 3・4 号の基準地震動 Ss とクリフエッジ (黒点線) および JNES による 1340 ガルの地震動 (赤波線)(水平 NS 方向)(2014 年 8 月)[27]

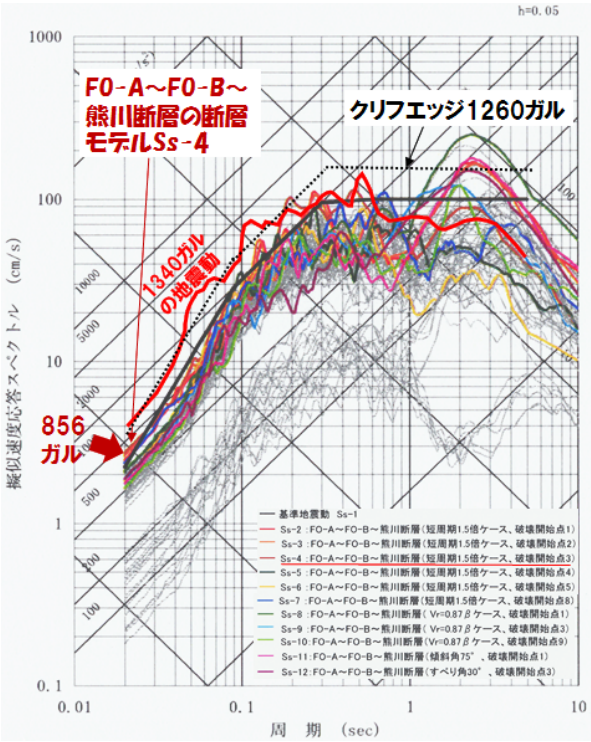


図 3: 大飯 3・4 号の基準地震動 Ss とクリフエッジ (黒点線) および JNES による 1340 ガルの地震動 (赤波線)(水平 EW 方向)(2015 年 3 月)[28]

ル (NS 方向) の地震動が観測されているが，図 4 のように他の仮想観測点では約 1,300 ガル (EW)，約 1,700 ガル (NS) の地震動が解析されている．また，震源断層モデルをそのまま使って，破壊開始点やすべり角など破壊の不確かさを補う解析も行っている．その結果，アスペリティ下端中央から破壊が始まった場合には，図 5 のように約 2,000 ガル (EW)，約 1,050 ガル (NS) の地震動が起こるとの解析結果が出されている．これらは仮想地表観測点での地震動評価結果であるため，解放基盤表面はぎとり波に換算しなければならないが，単純に比例計算すれば，620 ガルの Ss-7（高浜）と Ss-19（大飯）が 1.8 倍（EW 方向の倍率）の 1,100 ガルになりうる．これは高浜 3·4 号のクリフエッジ 973 ガルを超えている．このような実際の地震観測記録に基づく再現解析は現実の地震動を再現できることから，地震計の設置数の限界をカバーするものとして積極的に取り入れるべきである．

他方，原子力安全基盤機構 JNES は，国内の地震データに基づいて独自の断層モデルを構築し，表 1 に示される原発の解放基盤表面より堅い地震基盤表面（S 波速度 $Vs = 2600$m/s，図 6 参照）に観測点を置き，地震観測記録の不足を地震動解析で補っている．その結果，M6.5 の横ずれ断層による地震が起こると，図 7 のように震源近傍で 1,340 ガルの地震動が生じることを明らかにした [9]．図 8 の震源近傍での応答スペクトルを包絡する曲線が図 9 であり，図 2 および図 3 の赤波線である．これらの図で明らかなように，1,340 ガルの地震動は原発にとって重要な周期帯（0.03～0.5 秒）（巻末注 1）の大半でクリフエッジを超えている．

ちなみに，M6.5 の地震は地表に地震断層が現れないため，いくら詳細な調査を行っても発見できず，どこででも起こりうる小さな地震である．そのため，かつては「M6.5 の直下地震」が全原発に共通の限界地震として採用されていたのだが，その地震動は,「震央域外縁距離（M6.5 で 7.1km，M7 で 10km，M8 で 25km）の圏内ではカットされて一定になる」という非現実的な都合よい仮定によって過小評価されていた [45]．JNES の地震動解析結果は,「関西電力が設定し原子力規制委員会の承認した基準地震動は余りに過小すぎ，M6.5 の小さな地震でクリフエッジを超える大きな地震動が発生する」という重大な事実を述べ，警告しているのである．そうである以上， かつての「M6.5 の直

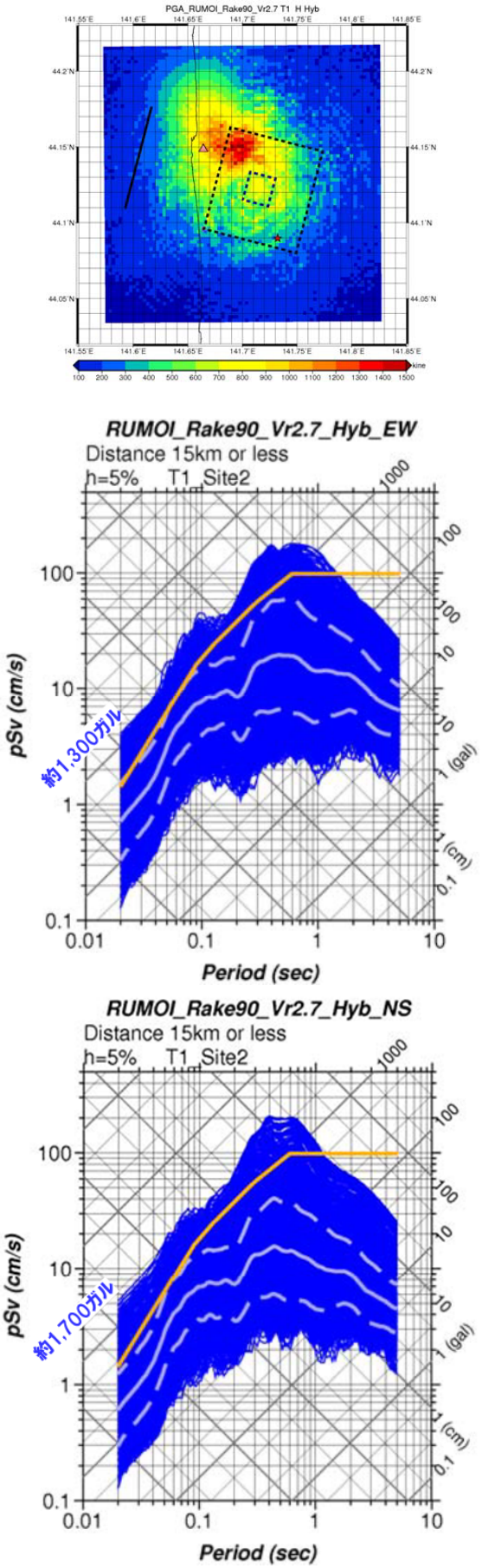


図 4: 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルによる震源近傍の地震動解析結果 [3]（上：応答加速度分布，△：HKD020 地点，☆：破壊開始点；中：断層最短距離 15km 以内の応答スペクトルの重ね書きで EW 方向，白線：平均，白破線：± 標準偏差；下：NS 方向,）

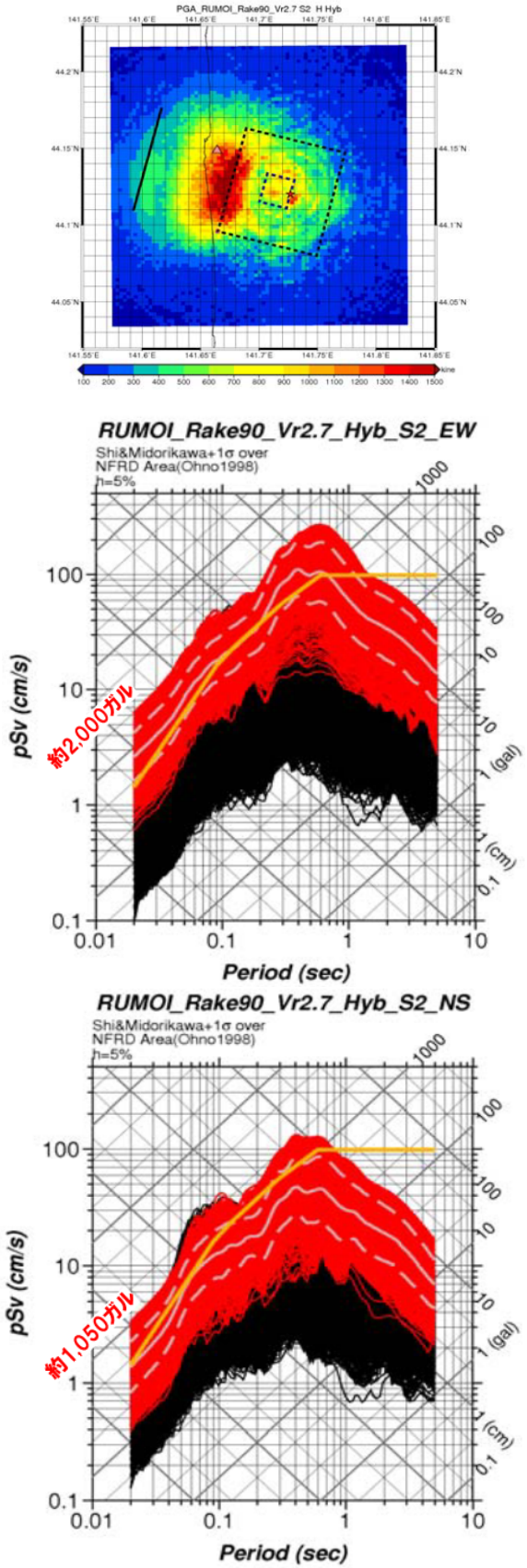


図 5: 2004 年北海道留萌支庁南部地震の震源モデルでアスペリティ下端中央から破壊が始まった場合の地震動解析結果 [3]（上：応答加速度分布，△：HKD020 地点，☆：破壊開始点；中：断層最短距離 15km 以内の応答スペクトルの重ね書きで EW 方向，赤実線：NFRD 効果を含む領域内の重ね書き，白線：赤実線領域内の平均，白破線：同 ± 標準偏差；下：NS 方向,）

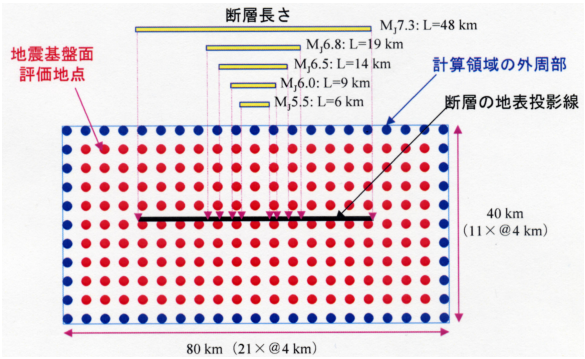
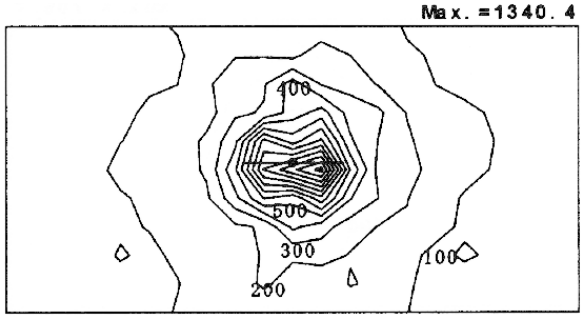
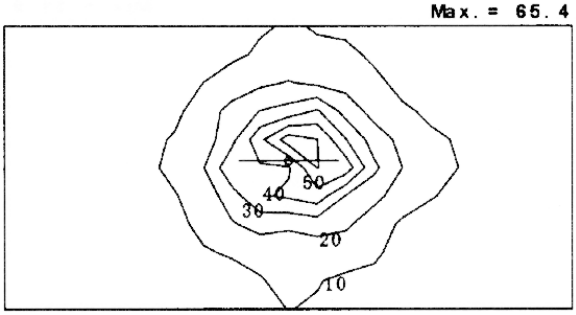


図 6: JNES による対象計算領域（地震基盤上の評価点：縦 11× 横 21 の格子点 231）と横ずれ断層の例 [9]



(a) 加速度分布図 (最大値 1340.4cm/s^2)



(b) 速度分布図 (最大値 65.4cm/s)

図 7: 横ずれ断層モデルによる地震動評価結果 (M6.5)[9]（地震発生層 2~20km，断層・アスペリティ上端 2km，実効応力大，高周波遮断特性平均 $+\sigma$）

下地震」の過小評価を繰り返さないためにも，これを「震源を特定せず策定する地震動」として基準地震動に加えるべきである．

この問題については，原子力規制委員会・原子力規制庁と市民団体との話し合いが昨年 7 月と今年 1 月の 2 度もたれ [49, 50]，規制庁は最終的に「専門家を入れて断層モデルの妥当性について検討すべきだ」と認めている．にもかかわらず，規制庁はこれをサボタージュしたまま，川内 1·2 号，高浜 3·4 号および伊方 3 号の審査書（再稼働認可）を出している．これで果たして，川内決定が主張

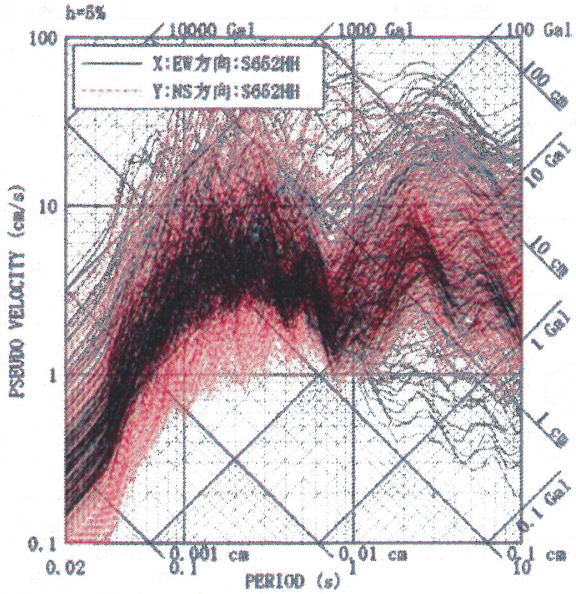


図 8: 横ずれ断層 (M6.5) の地震動評価結果 [9]（断層上端 2km，アスペリティの上端 2km，実効応力大 (19.1MPa)，高周波遮断特性平均 $+\sigma$ ($f_{\max} = 11.9$Hz) のケース）

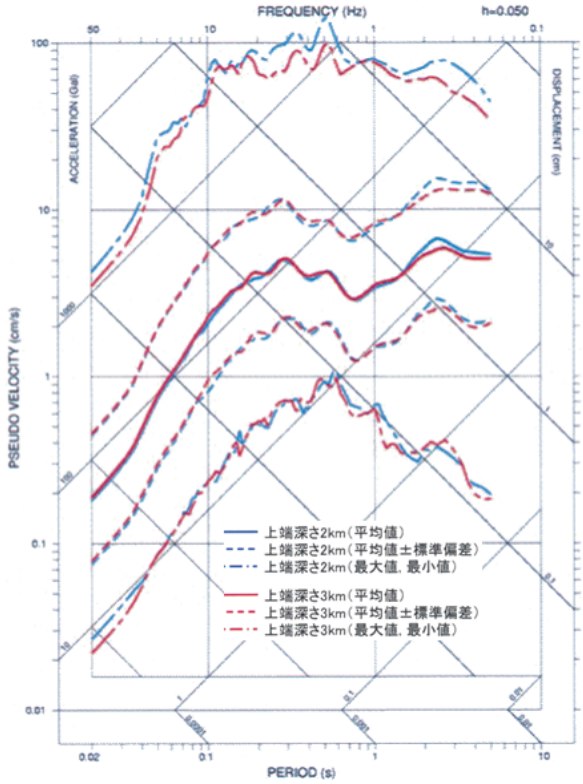


図 9: 横ずれ断層モデル (M6.5) による地震動評価結果 [9](（断層上端 2km(3km)，アスペリティの上端 2km(3km)，実効応力大 (19.1MPa)，高周波遮断特性平均 $+\sigma$ ($f_{\max} = 11.9$Hz) のケース)

するように「基準地震動は，原子力発電所の敷地において今後発生し得る最大の地震を想定して策定」されていると言えるであろうか．

地震観測記録の時間的・空間的制約を乗り越えるためには，このような地震動解析結果を利用するのが重要だと言える．ここまで踏み込まなけれ

ば，3·11 のフクシマ事故を教訓としたことにはならず，15.7m の津波が来る可能性を試算しながら無視した東京電力および貞観津波の危険性を検討すべきだと申し出た部下を恫喝して黙らせ，東京電力の過小評価を容認した原子力安全・保安院の過ち [50] を繰り返すことになるであろう．

3　震源を特定して策定する地震動

3.1　耐専スペクトルでは適用範囲が狭められ偶然変動のバラツキが無視されている

「震源を特定して策定する地震動」は，耐専スペクトル等による「応答スペクトルによる方法」と「断層モデルによる方法」があり，いずれにおいても地震動が過小評価されている．まず，前者の耐専スペクトルについて述べる．

耐専スペクトルは，国内地震観測記録に基づくものだが，震源近傍での大きな地震観測記録を含む最近 20 年間の最新データが反映されておらず，原子力規制庁によれば，日本電気協会で現在見直し作業中である．これが改定されれば，最新データを反映させる限りにおいて，近距離地震ではより大きな地震動評価に見直されることは必至である．また，耐専スペクトルは地震動の平均像を与えるものであり，地震動を過小評価しないためには地域性や偶然変動のバラツキを考慮する必要がある．

これらの問題点は，基準地震動の多くが耐専スペクトルによって規定されているという事実からみて，極めて重要であり，これらに十分配慮した地震動評価が不可欠である．

たとえば，高浜 3·4 号の基準地震動は，「FO-A～FO-B～熊川断層」（63.4km，M7.8，図 10 参照）に対する耐専スペクトルが，図 11 のように旧 Ss-1（550 ガル）を超えたため，新 Ss-1（700 ガル）へ引上げられた[1]．

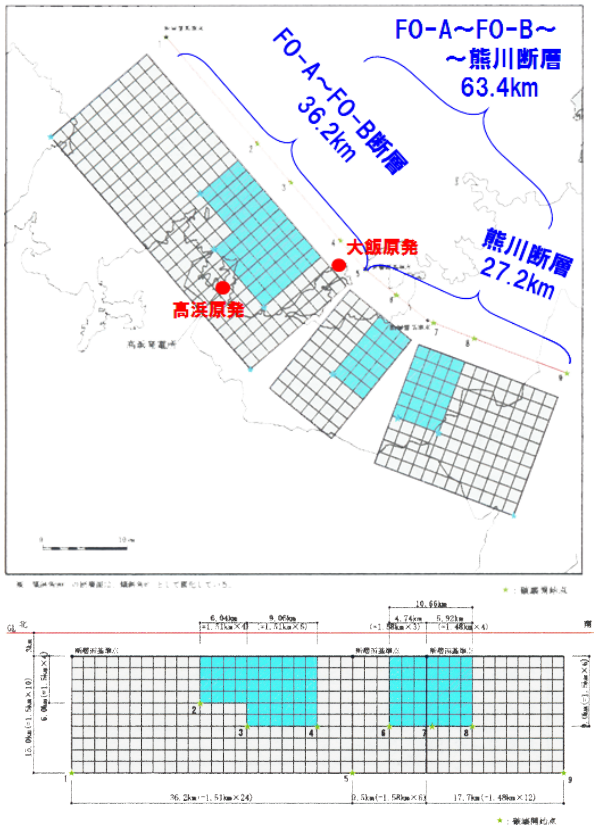


図 10: 高浜 3·4 号と大飯 3·4 号における FO-A～FO-B～ 熊川断層の断層モデル（上端深さ 3km の基本ケース）[27, 28]

しかし，大飯 3·4 号では，同じ「FO-A～FO-B～熊川断層」に対して耐専スペクトルは適用範囲外とされ，算出されていない．その結果，Ss-1 は古いままである．関西電力は，その理由を「極近距離との乖離が大きいため」と説明する [25]．確かに，図 14 に示すとおり，等価震源距離 X_{eq} は，高浜 3·4 号で 18.6km だが，大飯 3·4 号では 11.0km と小さく，極近距離より乖離している．しかし，大飯 3·4 号の基準地震動 Ss-18 として採用されている「鳥取県西部地震 (M7.3)・賀祥ダムの記録」は，等価震源距離が 6km と非常に小さく，極近距離からの乖離が大きいにもかかわらず，原子力安全委員会の意見交換会では図 16 を検討して「耐専スペクトルはまあまあ使える」と判断されている [41]（巻末注 2）．つまり，「極近距離からの乖離が大きい」というのは理由にならず，本来なら同等の地震観測記録と照合して，その適用可能性を説明すべきである．この点では，最近約 20 年間の震源近傍を含む M7 クラスの強震観測記録に基づき耐専スペクトルそのものを改定すべきであり，日本電

[1]耐専スペクトルの鉛直成分は周期約 0.1sec 以下で水平成分の約 0.6 倍になっているため，Ss-1H の 2/3 で作成されている鉛直基準地震動 Ss-1V（367 ガル）に対し，図 12 のように「基本ケース」等では下回り，「傾斜角 75 度のケース」でほぼ重なる程度である．しかし，Ss-1V は Ss-1H の 2/3 となるように作成されているため，こちらも 467 ガルへ引き上げられた．

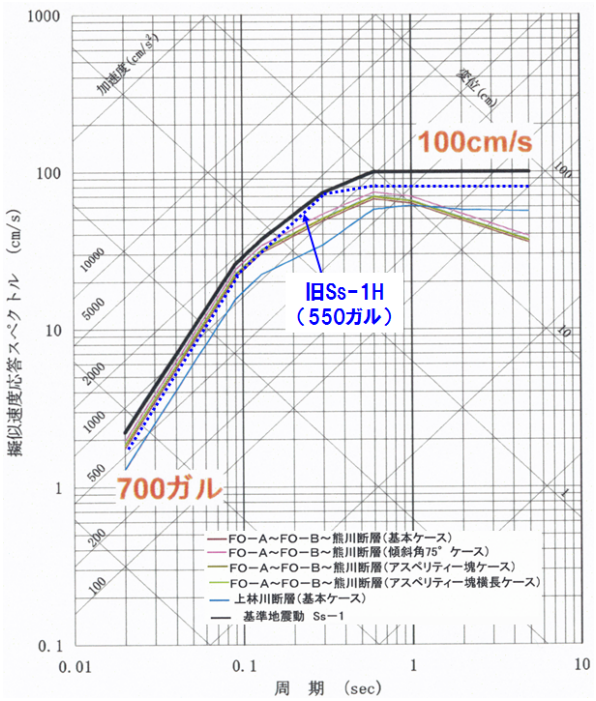


図 11: 高浜原発における FO-A～FO-B～ 熊川断層 (断層上端深さ 3km) の耐専スペクトルと新・旧基準地震動 Ss-1H(水平方向)[27]

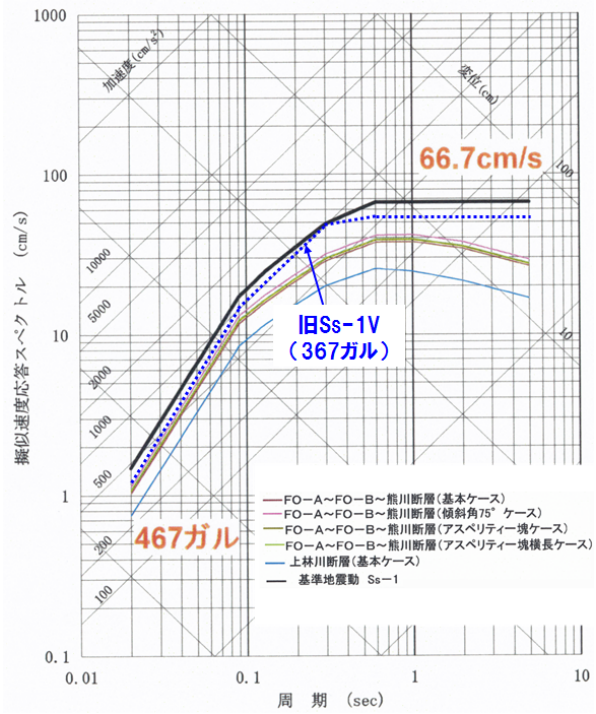


図 12: 高浜原発における FO-A～FO-B～ 熊川断層 (断層上端深さ 3km) の耐専スペクトルと新・旧基準地震動 Ss-1V(鉛直方向)[27]

気協会で現在見直し中の知見を反映させるべきである．

さらに，関西電力は，極近距離からそれほど乖離していない「FO-A～FO-B 断層」（M7.4，X_{eq} =

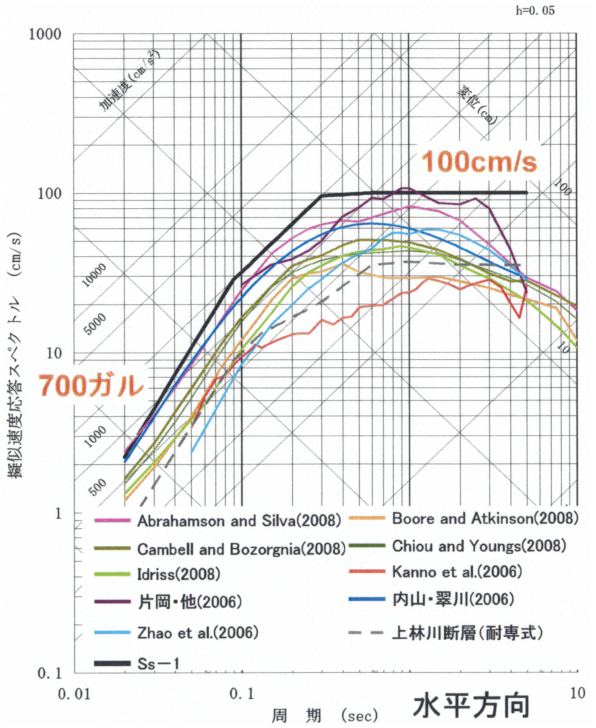


図 13: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層の距離減衰式による応答スペクトル，上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1 の比較（水平方向）(2015 年 3 月)[28]

10.5km，図 14 参照）についても，大飯 3·4 号に対し，同じ理由で耐専スペクトルを適用していない．

関西電力がこれらのケースについて耐専スペクトルを適用したくない理由は,「極近距離の線から乖離している」からではなく「地震動が大きくなりすぎる」からである．関西電力の示した図 15 で読み取れば,「FO-A～FO-B 断層（M7.4，$X_{\mathrm{eq}} = 10.5$ km）」で 800 ガル以上,「FO-A～FO-B～熊川断層（M7.8，$X_{\mathrm{eq}} = 11.0$km）」で 1200 ガル以上になる．いずれの場合も，700 ガルの基準地震動 Ss-1H を大きく超え，後者では大飯 3·4 号のクリフエッジ 1,260 ガルを超える可能性すらある．

ちなみに，関西電力は耐専スペクトルの代わりに距離減衰式による応答スペクトルを図 13 のように求めているが，一部の周期を除いて，ほとんど全周期にわたって Ss-1 以下である．また，高浜 3·4 号における図 11 の耐専スペクトルは大飯 3・4 号の Ss-1 にも極めて接近しており，これと比べても，距離減衰式による地震動評価は小さく，過小評価だと言える．耐専スペクトルは，図 15 のように，等価震源距離が高浜 3·4 号の 18.6km から大飯 3·4 号の 11.0km まで小さくなれば，それに伴って

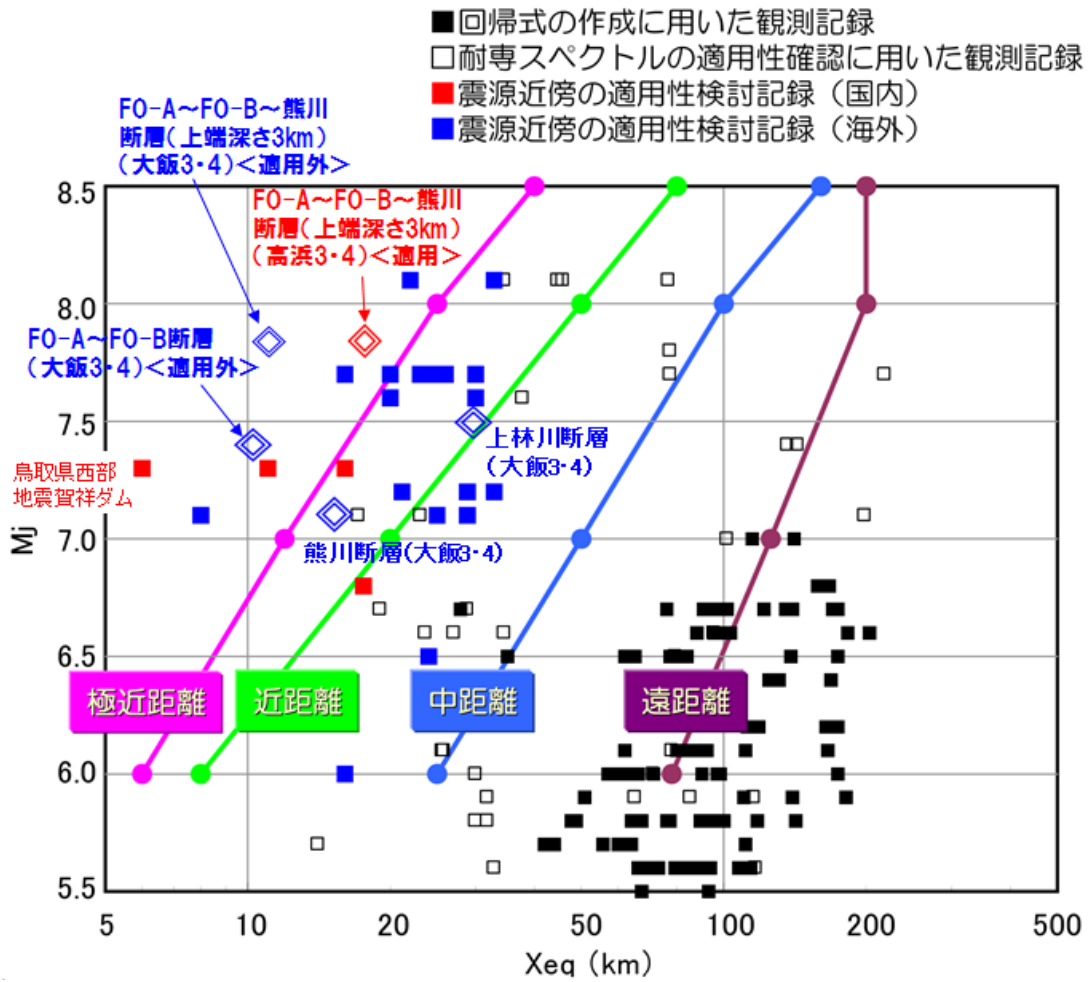


図 14: 耐専スペクトルの作成・適用性確認に用いられた地震データの等価震源距離 X_{eq} と気象庁マグニチュード M（図中は Mj と表記）[41]（大飯 3·4 号と高浜 3·4 号に関するデータ [27, 28] を二重線の菱形で加筆した）

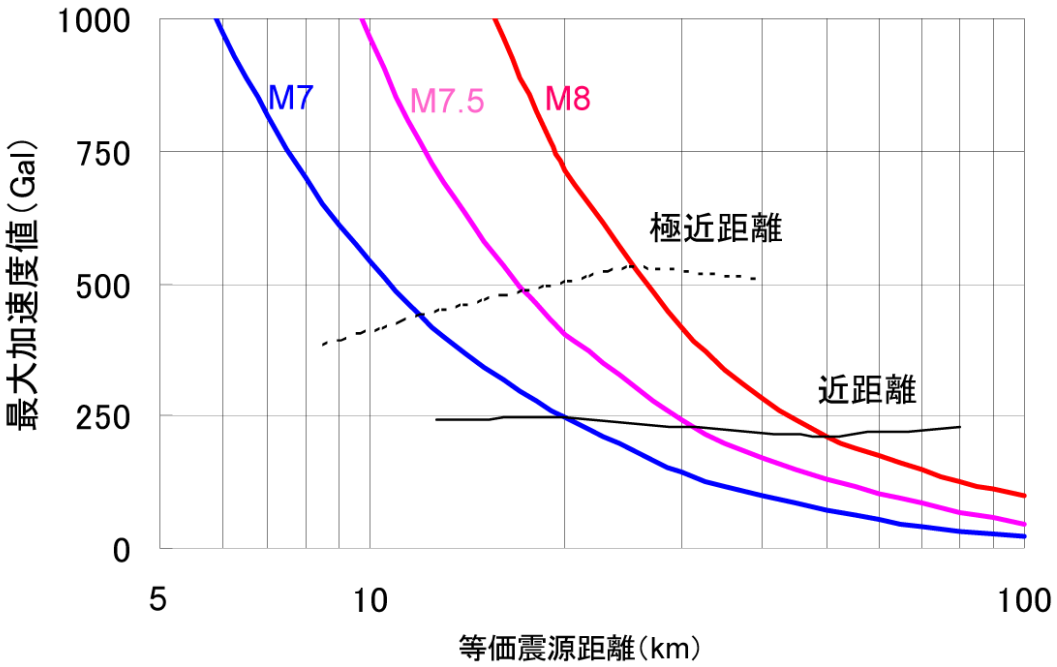


図 15: 耐専スペクトルにおける等価震源距離と地震動の最大加速度 [25]（この図から，大飯 3·4 号で適用範囲外にされている「FO-A～FO-B 断層（M7.4，$X_{\mathrm{eq}} = 10.5$km）」では 800 ガル以上,「FO-A～FO-B～熊川断層（M7.8，$X_{\mathrm{eq}} = 11.0$km）」では 1200 ガル以上になると読み取れる.）

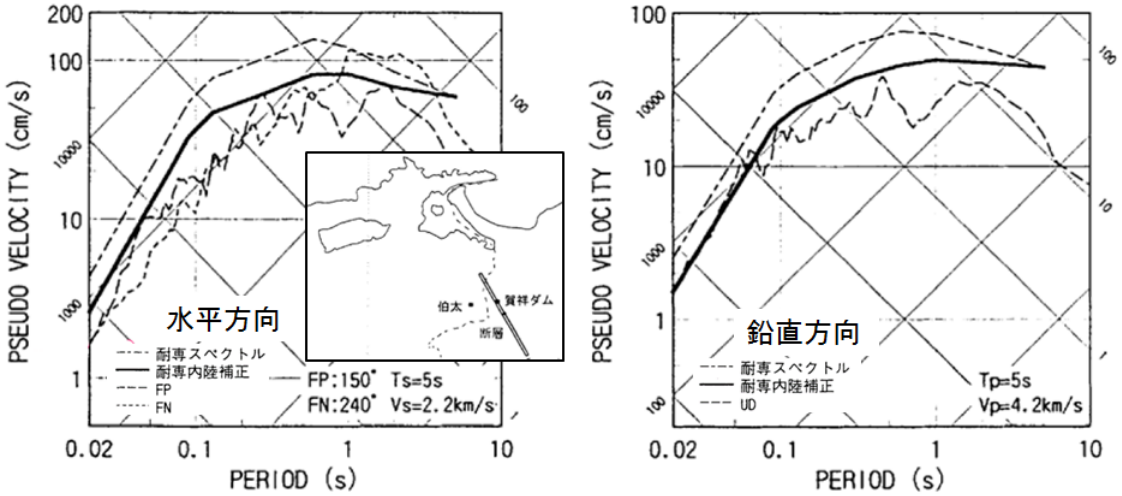


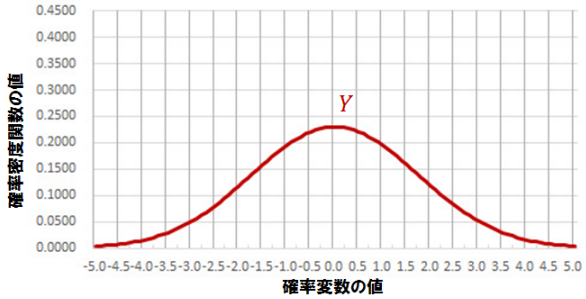
図 16: 2000 年鳥取県西部地震 (M7.3) の賀祥ダム ($X_{\mathrm{eq}} = 6$km) での地震観測記録と耐専スペクトルの比較

急激に大きくなり，1,200 ガル以上に達する．

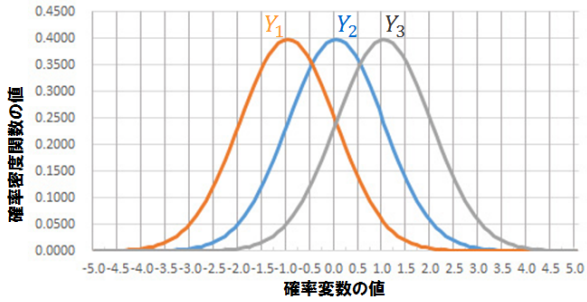
さらに，今の耐専スペクトルは，図 18 のように，地震観測データを地震規模（気象庁マグニチュード）と断層の拡がりを考慮した等価震源距離で分類し，データとの誤差 (バラツキ) をできるだけ小さくするような「平均像」として作成されている．地震基盤表面での地震動評価を行うことでサイト特性は可能な限り除去されているが，作成当時には国内地震観測記録が少なかったため，震源特性の異なる海洋プレート間地震と内陸地殻内地震が混在したままの「平均像」である．そこで，内陸地殻内地震用にはそれに則した補正係数を用いることになっているが，海洋プレート間地震との震源特性等の違いを補正しても，図 22 のように大きなバラツキがある．これは，東京電力が原子力安全委員会の指示により耐専スペクトルの適用可能性を 2009 年段階で検討したものであり，震源近傍 6〜33km の地震観測記録に対する耐専スペクトル（内陸補正有）からの残差を表している [41]．この図から，実際の地震観測値は残差平均より「倍半分」（やや太い青実線の範囲）以上のバラツキがあり，内陸補正をした耐専スペクトルからも「倍半分」（「観測/耐専」の値で 0.5〜2 の範囲）以上のバラツキがあることがわかる．

地震とは，プレート運動によって震源断層面ないしその周辺に蓄積された歪みエネルギーが断層運動によって一挙に解放される現象である．この歪みの大きさや場所の分布は一様ではなく，断層運動による破壊開始点，破壊伝播の速度・方向，ずれの大きさ・方向も一様ではなく，複雑な様相を帯びる．断層運動によって生じる個々の地震波も一様ではなく，破壊場所によって違う．このように断層破壊過程は一定の法則に従うとは言え，実際の破壊過程には，かなりの程度，偶然性が伴い，地震ごとに地震動が大きくばらつくことになる．このような震源における特性には地域性があり，横ずれ断層，逆断層，正断層によっても異なるが，地震データ不足のため仮説に留まっており，科学的な結論を得るには至っていない．地震波の伝わり方も距離とともに地震波が一様に減衰するのではなく，増幅される場合もあり，複雑な伝播経路特性を持つ場合がある．こうして得られる地震観測記録には，地中観測点が地震基盤と同様の固い岩盤であっても，地震によって，また，地中観測点によって大きなバラツキが生じる．このバラツキには，たとえ地震基盤で評価される耐専スペクトルのように観測点のサイト特性が除去されていても，震源特性，伝播経路特性，偶然変動によるバラツキが混在している．

このバラツキを地域性で説明するためには，十分な地震観測記録に加えて，震源特性や伝播経路特性に関するデータが不可欠である．たとえば，図 17 の (a) のように，確率変数 Y のデータが分布し，ばらついているとしよう．ここから，震源特性や伝播経路特性などの地域特性の違いによってデータを分類し，(b) のように確率変数 Y_1, Y_2, Y_3 の



(a) 全平均のバラツキ



(b)3 つの確率変数でバラツキを説明できる場合

図 17: 正規分布 $N(\mu, \sigma^2)(\mu = 0, \sigma^2 = 3)$ に従う確率変数 Y のバラツキ (標準偏差 $\sigma = \sqrt{3}$) を $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$ の 3 つの確率変数 $Y_1 \sim N(-1, 1^2)$, $Y_2 \sim N(0, 1^2)$, $Y_3 \sim N(1, 1^2)$ に分けて説明できる場合 (b) とそうでない場合 (a) の比較

分布に分離できたとする．そうすると，確率変数 $Y_1 \sim Y_3$ はそれぞれに異なる地域性を持ったデータの母集団になり，(a) の場合よりバラツキは小さくなるが，(b) の各分布のように偶然変動のバラツキは残る．この偶然変動は，サイコロを振って出る目を予測できないように，人が制御できないものであり，地域性を考慮して得た平均像からのバラツキに対して標準偏差の何倍かの余裕を持たせて保守性を確保するのが，工学的立場である．今の耐専スペクトルでは，このような地域性に基づいたデータの分類は不可能であり，平均像からのバラツキは「震源特性，伝播経路特性，偶然変動の混在したもの」として扱うしかない．このような場合には，「図 22 に見られる 6 倍程度の大きなバラツキを考慮すべき」という立論も可能になる．

他方，川内原発では，数は少ないが地震観測記録が得られている．九州電力が再稼働申請のために原子力規制委員会へ提出した資料が図 19 および図 20 であり，川内原発の敷地内で観測された 5 地震の観測記録を応答スペクトルに直し，耐専スペクトル（内陸補正なし）との比の平均を描いたものである．図 20 の破線で示される内陸補正係数が全国平均の内陸地殻内地震に対する耐専スペクトルの補正係数であり，川内原発の地震観測記録の平均応答スペクトル比（川内原発に対する補正係数）は短周期側で破線を越えており，1 に近い値すらとっている．つまり，内陸地殻内地震の全国平均より大きな地震動が敷地で観測されていることを示しており，ここに地域性が現れている．

ここで重要なのは，川内原発から数十 km の範囲で発生した地震に対する川内原発敷地内観測記録の平均応答スペクトル比（図 20 水平方向の実曲線）が全国平均を超えているということに加えて，この平均応答スペクトル比（図 21 では赤線）より上側へのバラツキが短周期側 (周期 0.02～0.5 秒) でほぼ 2 倍になっているということである．このバラツキは「全国各地で起きる地震や地震観測点における地域性の違い」ではなく，「川内原発周辺の地域性の違い」が少しは含まれるとは言え，偶然変動がかなりの部分を占めていると言える．

したがって，川内原発においては，耐専スペクトルで地震動評価を行う場合，上側に 2 倍のバラツキを考慮して保守的な地震動評価を行うべきだということになる．ただし，川内原発敷地で観測された図 19 の地震は M6 クラスの小規模地震（地表に地震断層が出現しない未飽和断層による地震）であり，M7 クラスの中規模以上の地震は含まれていないこと，また，10km 未満の近距離地震や震源近傍地震は観測されていないことなどを考慮すれば，これでも過小評価に陥る可能性は残る．

高浜 3·4 号や大飯 3·4 号では，このような敷地内地震観測記録が存在しないため，地域性を抽出することも偶然変動の大きさを評価することもできない．川内原発と同様の地域性があるとすれば，全国平均より大きな地震動が原発を襲うと言えるし，耐専スペクトルを少なくとも 2 倍にして川内原発で見られる 2 倍の偶然変動を考慮した保守的な評価を行うべきだということになる．そうすると，高浜 3·4 号では耐専スペクトルを 1,300 ガル以上へ，大飯 3·4 号では 2,400 ガル以上へ引上げる必要があるということになる．

ちなみに，関西電力などが耐専スペクトルで補正係数を用いていないのは，2007 年新潟県中越沖地震の教訓より「震源特性を 1.5 倍にする必要性

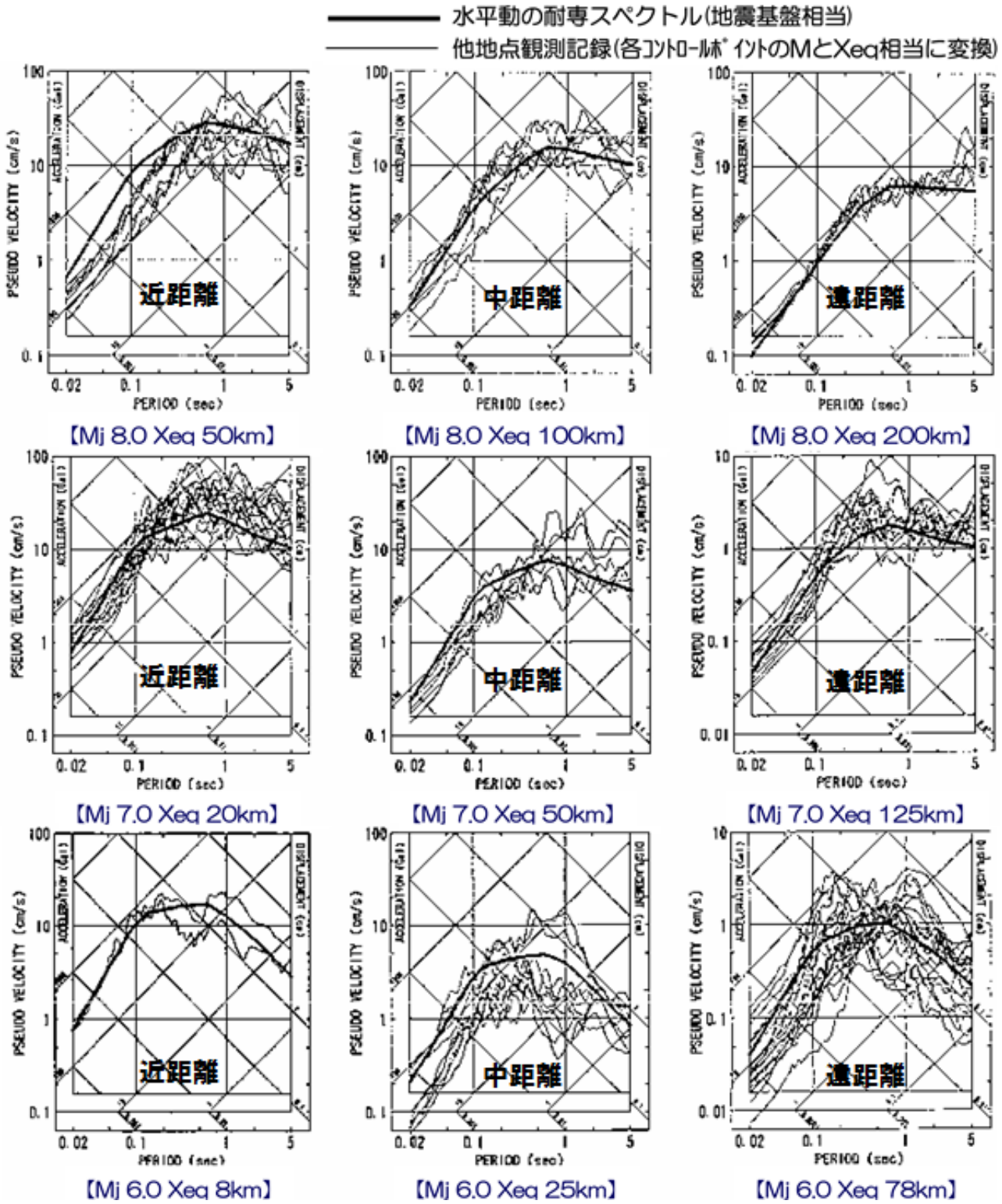
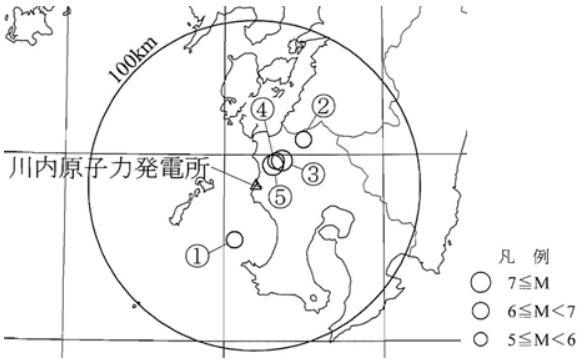


図 18: 耐専スペクトル作成の元になった地震観測記録の応答スペクトル（地震基盤表面はぎとり波）と耐専スペクトルの関係（気象庁マグニチュード Mj と等価震源距離 X_{eq} の組合せでデータを分類し，その平均像として耐専スペクトルを求めている．震源特性や伝播経路特性などの地域性や偶然変動などによるバラツキの大きいことがわかる.）[41]

がある」（図 31 参照）ことに鑑み,「耐専スペクトルに補正係数 (全国平均では図 20 の破線のように短周期側で 0.6 程度になる) を用いないことで 1.5 倍相当の余裕をもたせる」ためである．これは震源特性における地域性の違いを考慮するものであり，偶然変動による少なくとも 2 倍のバラツキを考慮すべきだという上記の議論とは全く別のものである．



番号	地震名	発生日時	
①	九州西側海域の地震	1984 年 8 月 15 日	3 時 30 分頃
②	鹿児島県北西部の地震	1994 年 2 月 13 日	2 時 6 分頃
③	鹿児島県北西部地震：本震	1997 年 3 月 26 日	17 時 31 分頃
④	鹿児島県北西部地震：余震	1997 年 4 月 3 日	4 時 33 分頃
⑤	鹿児島県北西部地震：本震	1997 年 5 月 13 日	14 時 38 分頃

図 19: 川内原発で観測された活断層による地震 [29]

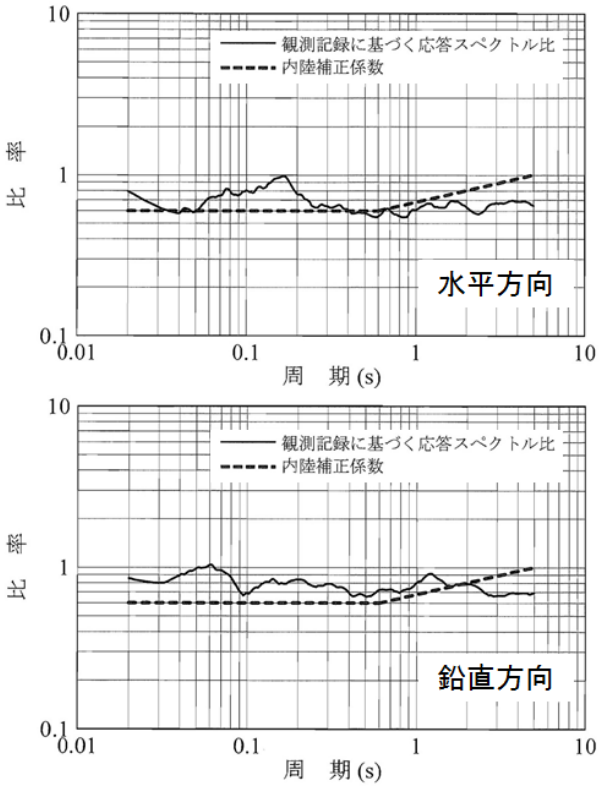


図 20: 川内原発での内陸地殻内地震観測記録に基づく耐専スペクトルの補正係数 [29]（破線は Noda et al.(2002)[32] の示した国内の内陸地殻内地震に対する平均的な補正係数，実線が川内原発での観測記録に基づく補正係数）

3.2　断層モデルのレシピは地震規模と応力降下量を過小設定し，地震動を過小評価している

次に，高浜 3·4 号と大飯 3·4 号における断層モデルによる地震動の過小評価について述べる．

高浜 3·4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果（基本ケースに加え短周期 1.5 倍ケースなど不

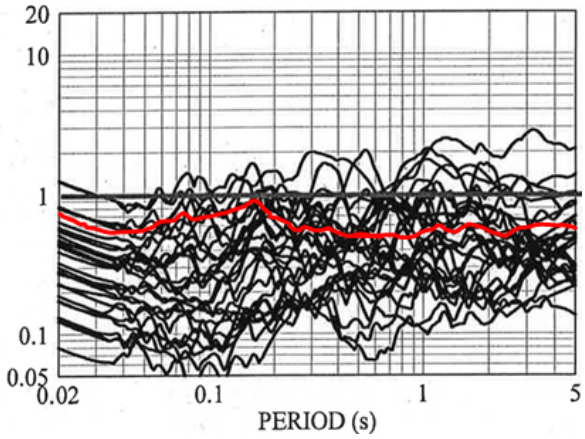


図 21: 川内原発の敷地地盤で得られた観測記録の応答スペクトルと Noda et al.(2002) の方法により求められた応答スペクトルの比 （主文 [43] 別紙図④p.294：図 20 水平方向の応答スペクトル比を赤線で追記）

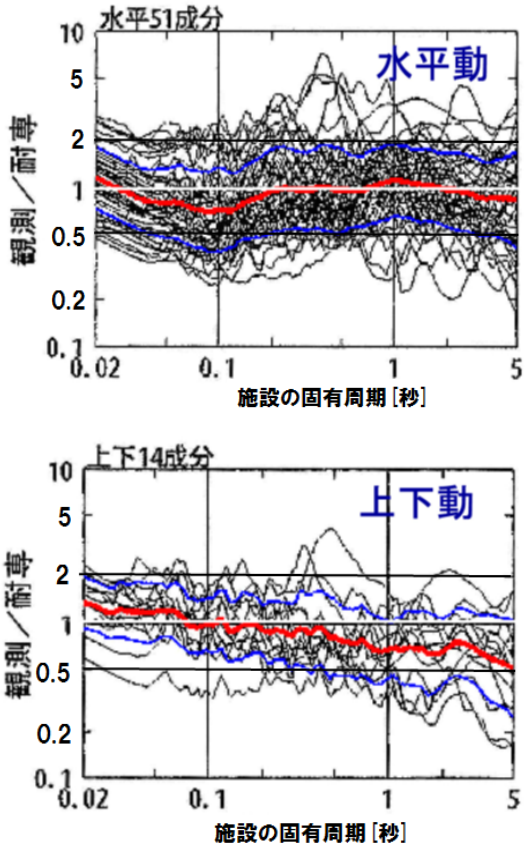


図 22: 国内外の内陸地殻内地震による震源近傍の観測記録 (M6.0~8.1, X_{eq} = 6 ～ 33km, 水平 51 記録, 上下 14 記録) の耐専スペクトル (内陸補正有) との残差 (バラツキ)[41]（細線：各地震観測記録に対する残渣，太い赤実線：残差の平均，やや太い青実線：平均からの「倍半分」の差，0.5 秒付近では水平動で 6 倍程度，上下動で 4 倍程度の残差がある）

確実さを考慮した全ケースを含む）を重ね書きしたものが図 23～ 図 25 であり，図中の赤線が耐専スペクトル（内陸補正無），黒折れ線が基準地震動 Ss-1 である．

鉛直方向の図 25 では，短周期側でやや小さいも

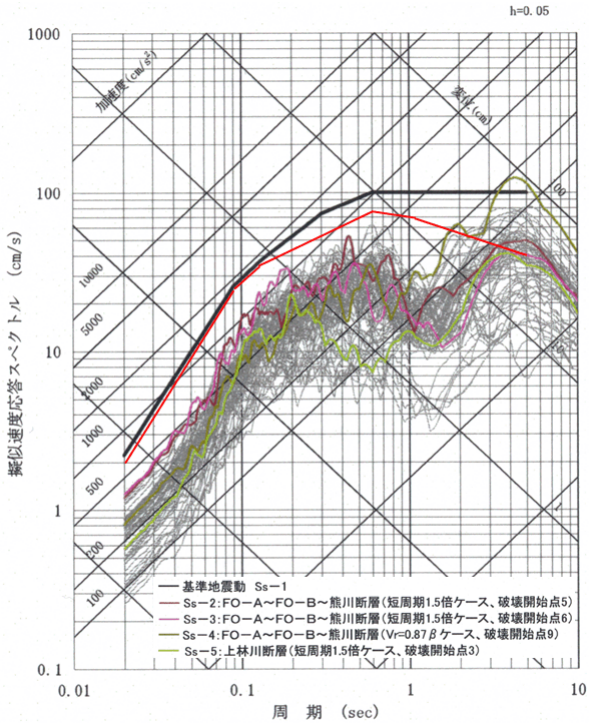


図 23: 高浜 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果 (灰色の波線は基準地震動 Ss-2～5 以外の全評価結果) と FO-A～FO-B～熊川断層（傾斜角 75 度）の耐専スペクトル (赤折れ線) および基準地震動 Ss-1(水平 NS 方向)(2014 年 8 月)[27]

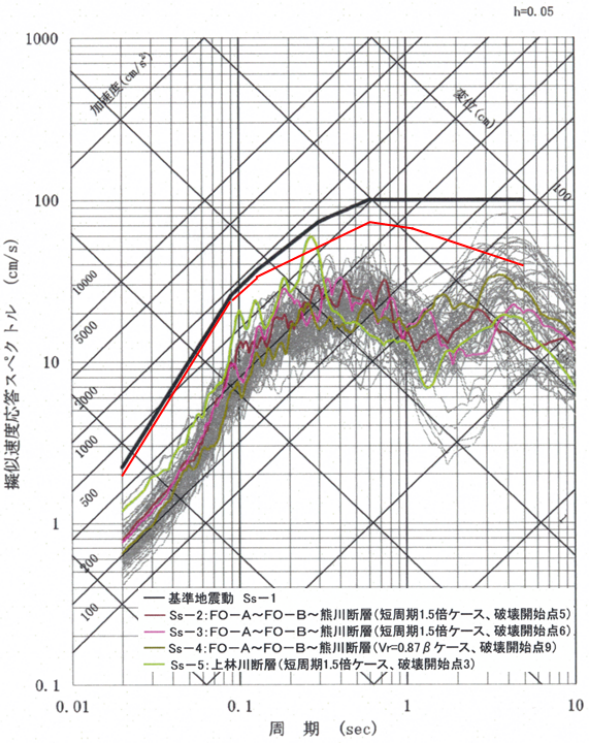


図 24: 高浜 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果 (灰色の波線は基準地震動 Ss-2～5 以外の全評価結果) と FO-A～FO-B～熊川断層（傾斜角 75 度）の耐専スペクトル (赤折れ線) および基準地震動 Ss-1(水平 EW 方向)(2014 年 8 月)[27]

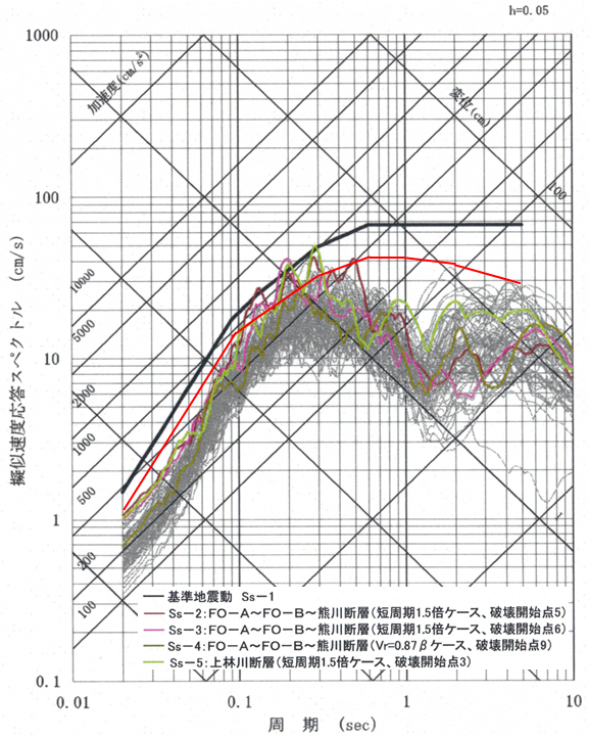


図 25: 高浜 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層および上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果 (灰色の波線は基準地震動 Ss-2～5 以外の全評価結果) と FO-A～FO-B～熊川断層（傾斜角 75 度）の耐専スペクトル (赤折れ線) および基準地震動 Ss-1(鉛直方向)(2014 年 8 月)[27]

のの耐専スペクトルとほぼ整合していると言えるが，図 23と図 24 では，原発にとって重要な短周期領域 0.03～0.5sec で耐専スペクトルの 1/2 程度またはそれ以下である．これは明らかに過小評価だと言える．

この差について，原子力規制庁は「手法の違い」でごまかし，関西電力は「耐専スペクトルは震源断層を点震源とみなし，断層モデルは震源断層をそのまま評価するからだ」と決めつける．しかし，同じ関西電力の説明では，耐専スペクトルは「原子力発電所の地震動評価に適した信頼性の高い手法」だったはずであり，単なる「点震源」ではなく震源断層の広がりやアスペリティなどを考慮した等価震源距離を用いており，批判は当たらない．

そうではなく，問題は地震データの違いにある．耐専スペクトルは国内の地震データに基づいているのに対し，今の断層モデルは北米中心の地震データ（日本国内より平均断層幅が大きい）に基づいており，この断層モデルを日本国内の震源断層にそのまま適用すると，地震規模や応力降下量が過小評価されるからである（巻末注 3）．

これを端的に物語る「島根原発における宍道断層」の例を示そう．

中国電力は2006年指針改定に伴うバックチェック中間報告 [5] で，宍道断層（長さ22km，M7.1）について，断層モデルのレシピに基づく地震動評価（長さ22km，断層幅13kmの基本ケース，短周期側は統計的グリーン関数法，長周期側は理論的方法のハイブリッド合成法）を行い，図26黒線のように示している．耐専スペクトルについては，等価震源距離が9.0kmと近すぎるという理由で適用していないが，図26の赤線のように「参考」扱いとしながらも示している．ただし，当時の耐専スペクトルは島根原発敷地内での地震観測記録に基づいて補正（図26の右図が補正係数）されたものであり，断層モデルと条件は等しい．図26で明らかなように，断層モデルによる地震動評価結果は，周期0.02〜0.2秒の重要な周期帯で耐専スペクトル (内陸補正後) の1/2程度にすぎない．これは高浜3·4号における結果（図23および図24）と全く同じである．

島根原発でも，断層モデルのレシピに従い，地震規模がM7.1(松田式による) ではなくM6.8と小さく設定され，その結果，応力降下量も小さく設定されていた．そこで，2010年の第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3[5] では，地震規模をM7.1として震源断層を少し大きく設定し直す修正レシピによって，地震動評価をやり直させた．

これは推本が2008年に公表した修正レシピ [20] に基づくものであり，断層幅を13kmから15kmへ拡張し，地震モーメントをM7.1に相当する1.06×10^{19}N·mとし，断層モデルのレシピに基づいて，応力降下量を断層平均で2.3MPaから4.32MPaへ，アスペリティ平均で15.1MPaから19.7MPaへ引上げ，解放基盤表面上観測点（2km間隔）での地震動を図27のように求めている．図27における最上部の地震波が極近傍の地震波であり，断層最短距離2kmに位置する島根原発の解放基盤表面での地震動評価に相当する．これと宍道断層 (M7.1, $X_{\mathrm{eq}}=9.0$km) の耐専スペクトルはよく重なり合っている（巻末注4）．つまり，断層モデルのレシピをそのまま適用するのではなく，松田式（巻末注5）で求めた地震規模に合わせて断層モデルを少し修正すれば，断層モデルと耐専スペクトルによる地震動評価結果は互いによく合ってくるのである．

高浜3·4号の場合にも同じことが言える．

表4には，「FO-A〜FO-B〜熊川断層」（断層長さ63.4km，M7.8）の断層モデルのパラメータを示したが，関西電力はこの断層の地震規模をM7.7（$M_0=5.03\times10^{19}$Nm）と小さくし，応力降下量を断層平均3.1MPa，アスペリティ平均14.1MPaとしている．地震規模を松田式によるM7.8（$M_0=7.01\times10^{19}$Nm）とした場合には，応力降下量はそれぞれ5.8MPa，26.5MPaになる．ただし，修正レシピのようには断層面積を増やしていない．また，関西電力は応力降下量を100km以上の長大な断層の場合に適用すべきFujii-Matsu'ura(2000) を用いて小さく設定している（巻末注5）．

このように，高浜3·4号においても，島根原発の場合と同様に，松田式に基づく地震規模や応力降下量を用いれば，断層モデルと耐専スペクトルにおける地震動評価結果の差がほとんどなくなることは明らかである．つまり，断層モデルと耐専スペクトルとで差が生じる原因は，断層モデルにおけるパラメータ設定の過小設定にあったのである．

この点で注目すべきは，先に示した前原子力規制委員会委員長代理の島崎邦彦氏による学会発表での入倉式への批判である [36]．これは断層モデルのレシピ（入倉式）による地震規模が松田式による値より過小設定になると批判し警告したものである．それを応力降下量に関する批判にまで徹底させれば，ここでの指摘と完全に一致する．

次に，大飯3·4号の基準地震動に移ろう．

大飯3·4号では，「FO-A〜FO-B〜熊川断層」の耐専スペクトルは等価震源距離が11.0kmと近いため適用外とされており，700ガルの基準地震動Ss-1はそのままで，もっぱら断層モデルによる評価が行われている．その結果が，図28〜図30であり，基準地震動Ss-2〜17以外の灰色の波線が不確実さを考慮した全ケースの重ね書きである．これらの図を高浜3·4号の結果（図23〜図25）と比べるとほぼ2倍になっている．このことは，高浜3·4号の基準地震動Ss-2〜4（表2）と大飯3·4号の基準地震動Ss-2〜17（表3）の最大加速度（周期

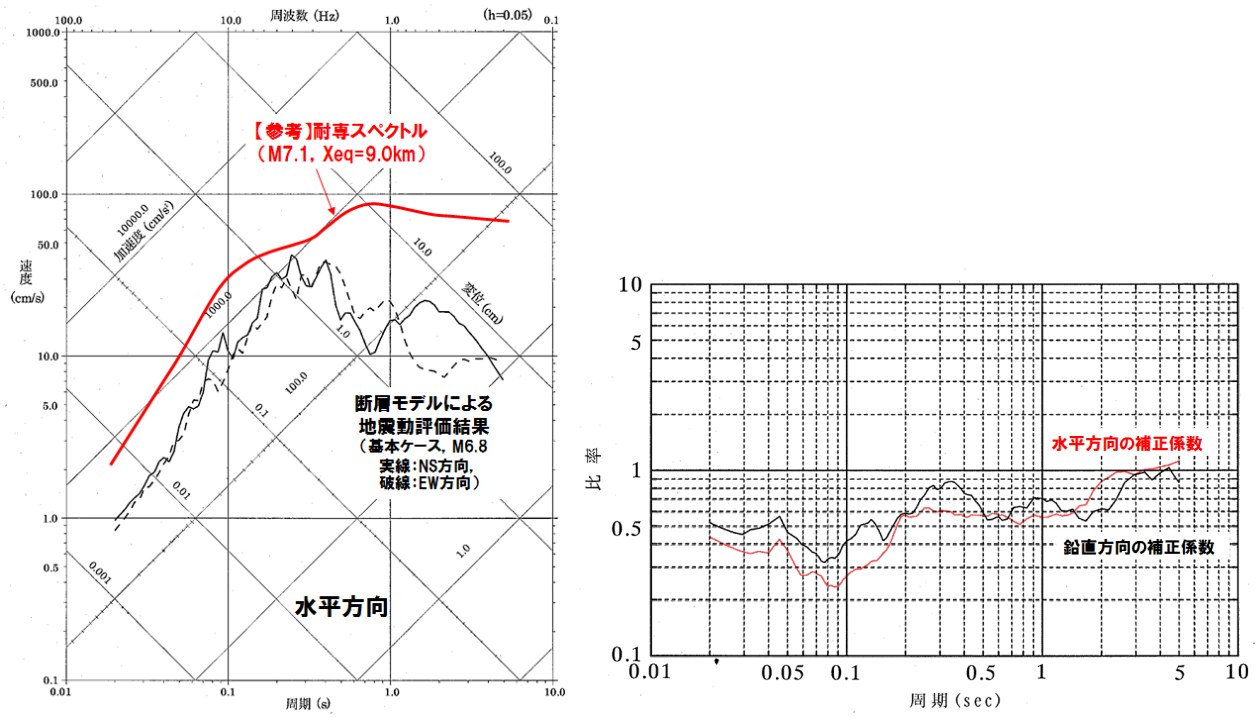


図 26: 宍道断層 (M7.1, $X_{\mathrm{eq}} = 9.0$km) の耐専スペクトル (右図「島根原発敷地内地震観測記録による補正係数」で補正されたものだが，宍道断層が近すぎるため適用範囲外とされ「参考」扱いにされている) と断層モデル（M6.8, 長さ 22km, 幅 13km）による地震動評価結果の比較 [6]

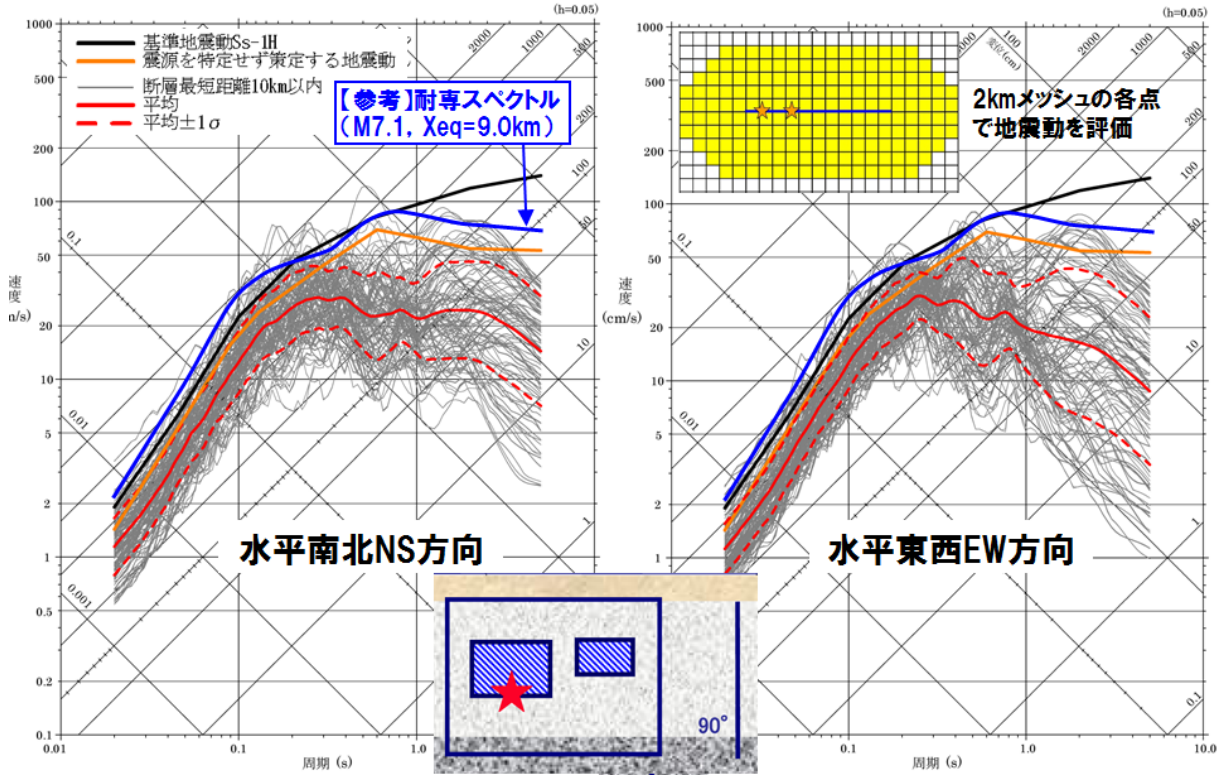


図 27: 宍道断層 (M7.1, $X_{\mathrm{eq}} = 9.0$km) の耐専スペクトル (図 26 と同じ,【参考】として追記) と修正断層モデル（ケース 2：M7.1, 長さ 22km, 幅 15km，破壊開始点第 1 アスペリティ下端中央）による断層周辺極近傍観測点での評価結果の比較 [5]

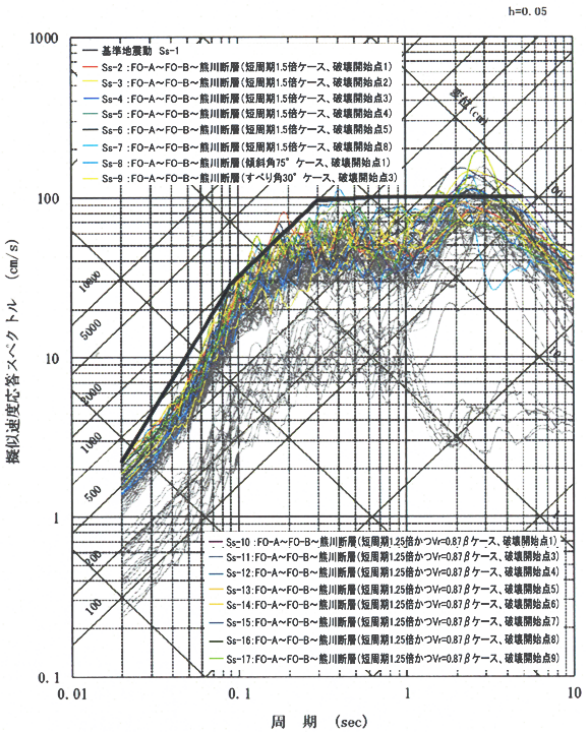


図 28: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層と上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1（水平 NS 方向）(2015 年 3 月)[28]

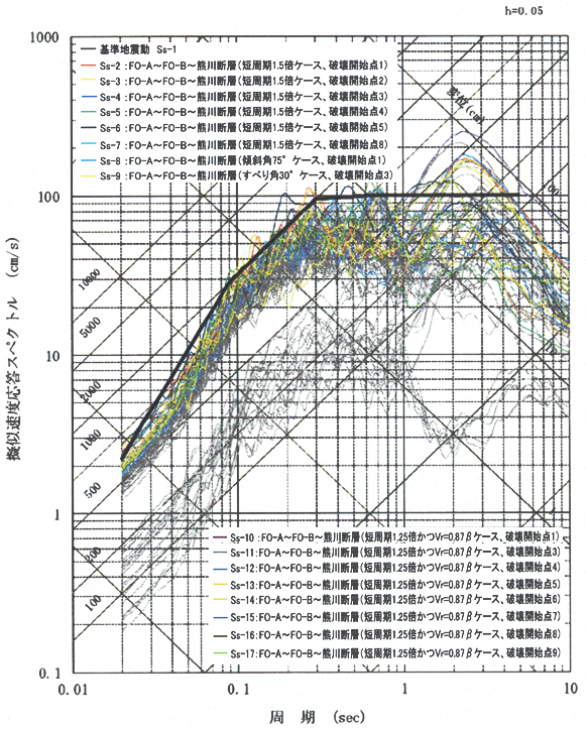


図 29: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層と上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1（水平 EW 方向）(2015 年 3 月)[28]

0.02 秒における応答加速度に相当する）を比べてみれば，一目瞭然であり，EW 方向では 2～3 倍にもなっている．ところが，Ss-1 の最大加速度は全く変わらない．耐専スペクトルが適用外になって

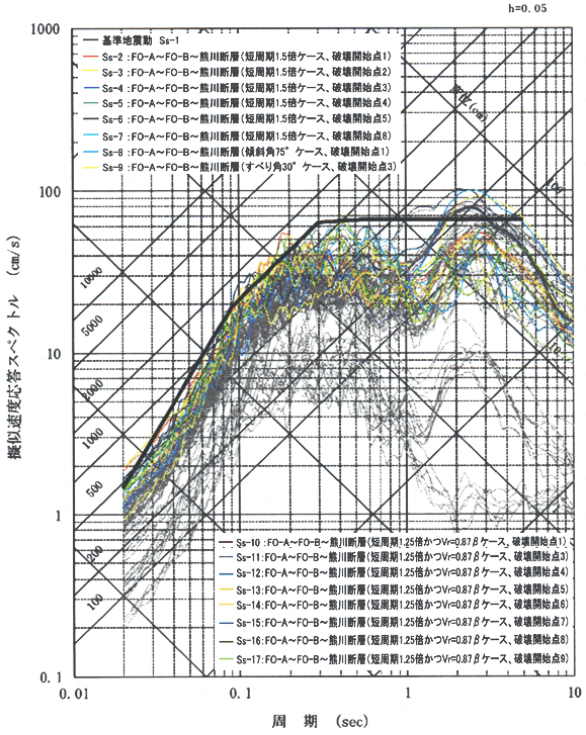


図 30: 大飯 3・4 号における FO-A～FO-B～熊川断層と上林川断層の耐専スペクトルと基準地震動 Ss-1（鉛直方向）(2015 年 3 月)[28]

いるからである．

先に，大飯 3·4 号における「FO-A～FO-B～熊川断層」（M7.8，$X_{\mathrm{eq}} = 11.0$km）の耐専スペクトルは，図 15 から 1,200 ガル以上に達すると書いた．断層との距離が小さくなって，断層モデルによる地震動評価結果が 2 倍になるのであれば，耐専スペクトルによる地震動評価が 700 ガル弱からほぼ 2 倍の 1,200 ガル以上になって当然である．等価震源距離が極近距離から乖離していても「適用外」とされなければならないほど，耐専スペクトルが地震動を「過大評価」するとは言えない．2000 年鳥取県西部地震における賀祥ダムと同様に妥当と言えるのではなかろうか．

「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層パラメータは表 4 の通りであり，大飯 3·4 号と高浜 3·4 号とで変わらない．大飯 3·4 号でも地震規模と応力降下量が過小設定されており，松田式に基づく地震規模と応力降下量で置換えれば，断層モデルによる地震動評価は耐専スペクトルによる地震動評価と一致するはずである．この論争に決着を付けるには，実際に「FO-A～FO-B～熊川断層」で地震が起きる以外にないが，それでは遅すぎる．福島第一原発事故を真に教訓とするのであれば，耐専ス

表 4: FO-A～FO-B～熊川断層の断層パラメータ（上端深さ 3km の基本ケース）」[25, 27, 28]

断層パラメータ（すべて $S_a/S = 0.22$ 法による）		断層モデルで M7.7 とした場合（関電） 全体	FO-A～FO-B	熊川断層	松田式 (M7.8) 全体
断層長さ L		63.4 km	36.2 km	27.2 km	63.4 km
断層幅 W		15.0 km			
断層面積 $S = LW$		951 km^2	543 km^2	408 km^2	951 km^2
断層上端深さ		3 km			
断層下端深さ		18 km			
破壊開始点		各アスペリティ下端 6 種類＋断層下端 3 種類			
破壊伝播方式		同心円状 (放射状)			
地震モーメント M_0 [N·m]		5.03×10^{19}	3.05×10^{19}	1.98×10^{19}	7.01×10^{19}
マグニチュード		M7.7，M_W7.1			M7.8，M_W7.2
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		151.2 cm	160.3 cm	139.0 cm	210.8 cm
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.5×10^{10} N/m^2			
S 波速度 V_s(または β)		3.6 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.59 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{3/2}$		3.1 MPa（4.2MPa）*1			5.8 MPa
短周期レベル A [N·m/s^2]		1.96×10^{19}			2.19×10^{19}
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$		1.61 sec			1.80 sec
アスペリティ全体	面積 S_a	209.22 km^2	119.46 km^2	89.76 km^2	209.22 km^2
	地震モーメント M_{0a} [N·m]	2.22×10^{19}	1.35×10^{19}	8.77×10^{18}	3.10×10^{19}
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.1 MPa（19.0MPa）*1			26.5 MPa
	平均すべり量 D_a	303.9 cm	322.3 cm	279.4 cm	423.7 cm
アスペリティ大	面積 S_{a1}	–	79.64 km^2	–	–
	地震モーメント M_{0a1} [N·m]	–	9.95×10^{18}	–	–
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1}$	–	14.1 MPa*1	–	–
	平均すべり量 D_{a1}	–	357.1 cm	–	–
アスペリティ小	面積 S_{a2}	–	39.82 km^2	–	–
	地震モーメント M_{0a2} [N·m]	–	3.52×10^{18}	–	–
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2}$	–	14.1 MPa*1	–	–
	平均すべり量 D_{a2}	–	252.5 cm	–	–
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	741.78km^2	423.54 km^2	318.24 km^2	741.78 km^2
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	2.81×10^{19}	1.70×10^{19}	1.11×10^{19}	3.91×10^{19}
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.8 MPa（3.8MPa）*1			5.3 MPa
	平均すべり量 D_b	108.1 cm	114.7 cm	99.4 cm	150.7 cm
Q 値		$50f^{1.1}$			
高周波限界遮断周波数 $f_{\max}$		8.3Hz			

注：「$S_a/S = 0.22$ 法」とはアスペリティ総面積を断層面積の 22 %に固定する方法である．関西電力は,「FO-A～FO-B」の 35.3km モデルでは A 法（$S_a/S = 0.248$）を用い，熊川断層との連動 63.4km モデル（A 法では $S_a/S = 0.366 > 0.30$）では「$S_a/S = 0.22$ 法」を用い，さらに Fujii-Matsu'ura(2000) で応力降下量を小さく設定している．

*1：地震調査研究推進本部 (推本) による断層モデルのレシピによれば，長大な断層の場合には，Fujii-Matsu'ura(2000) の $M_o-(L, W)$ 関係式から導かれた断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 3.1$MPa を用い，アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22 = 14.4$MPa（上表では 14.1 となっているが，原本での数値の丸め誤差による）と算出して用いることを推奨している．問題はどの長さ以上を「長大な断層」とみなすかであるが，推本の「活断層の長期評価手法（暫定版）」報告書 (2010.11.25) では「長さが 100km を超えるような長大な断層」(同報告書 p.6) と定義しており，63.4km では到底，長大な断層とは言えない．そこで，長大でない断層の場合に用いられるレシピで平均応力降下量を算出して括弧内に記しておいた．通常のレシピによれば，アスペリティの平均応力降下量は 19.0MPa となり，14.1MPa の 1.35 倍になることがわかる．また，断層長さから松田式で求めた地震規模は M7.8 になり，地震モーメント M_o で比較すると 1.4 倍になる．その結果，応力降下量も，断層平均 5.8MPa，アスペリティ平均 26.5MPa と大きくなる．不確実さの考慮では応力降下量を 1.5 倍しているが，14.1 MPa では 21.2MPa に留まるが，大飯原発の地震動評価ではこの地震動が基準地震動 Ss-1H を超えている．19.0MPa の 1.5 倍は 28.5MPa となるから，さらに大きく超え，26.5MPa とその 1.5 倍化も考慮すればさらに大きく超えることになろう．

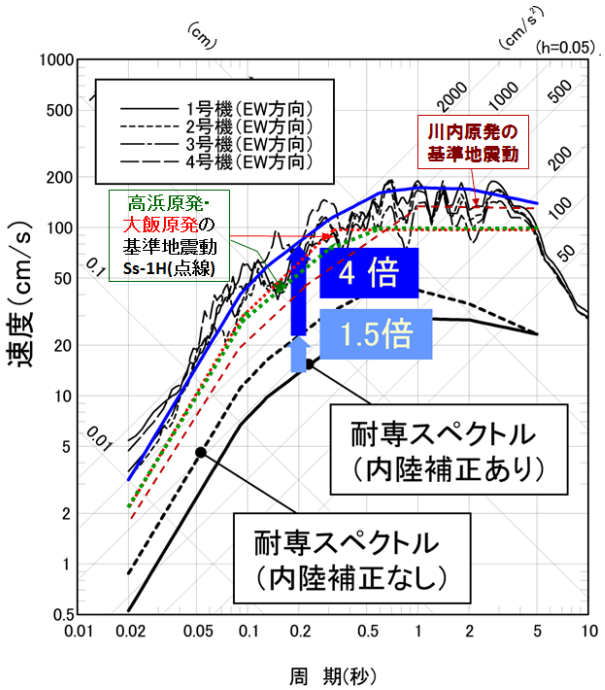


図 31: 柏崎刈羽原発 1～4 号での新潟県中越地震時の解放基盤表面地震動はぎとり波の応答スペクトル（東西 EW 方向）[40]（東電が推定した解放基盤表面地震動 (はぎとり波) の最大加速度（上図で周期 0.02 秒における応答加速度に対応する）は，1699gal(1 号)，1011(2 号)，1113(3 号)，1478(4 号)，766(5 号)，539(6 号)，613(7 号) である．耐専スペクトルの「内陸補正あり」は海洋プレート間地震のデータ等の混在したデータによる耐専スペクトルを内陸地殻内地震のスペクトルに補正するもので,「内陸補正なし」を約 0.6 倍したものである.）

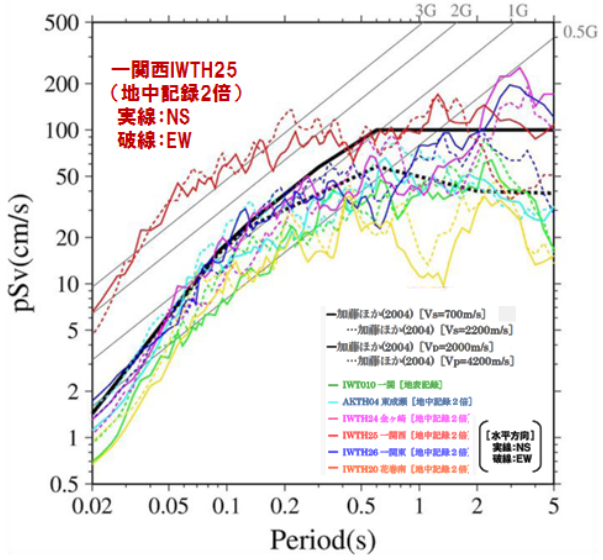


図 32: 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地中地震観測記録の応答スペクトル [11] を 2 倍にした「はぎとり波」相当の応答スペクトル [12]（一関西 IWTH25 観測点の「はぎとり波」は NS 方向で 2,000 ガルになり，短周期側で大きく盛り上がっている）

表 5: 2008 年岩手・宮城内陸地震 M7.2 による強震観測値（加速度 [gal]，速度 [cm/s]）[1]

観測点	3 成分合成	東西	南北	上下
一関西 (地表)	4022 gal	1143	1433	3866
(地中)	1078 gal	1036	748	640
一関西 (地表)	100.1cm/s	71.0	61.5	84.7
(地中)	73.2cm/s	42.2	37.2	68.5

ペクトルを適用し，断層モデルのパラメータを設定し直して，地震動評価をやり直すべきである．

1,300 ガル以上の地震動は実際に観測されている．

2007 年新潟県中越沖地震 (M6.8) では図 31 のように 1699 ガル（解放基盤表面はぎとり波），2008 年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) では，表 5 のように地中で 1,078 ガル（3 成分合成），解放基盤表面はぎとり波相当で図 32 のように NS 方向 2,000 ガル（[12]p.31）の地震動が相次いで観測された．これらはいずれも高浜 3・4 号と大飯 3・4 号のクリフエッジを超えている．

2007 年新潟県中越沖地震以降，震源特性として約 1.5 倍[2]の不確実さを考慮し，深部地下構造や 3 次元地盤構造を詳細に調べることが常識となった．そのため，耐専スペクトルでは，内陸補正を行わないことで震源特性の不確実さを考慮することになったのである．これに対応して，断層モデルでも，不確実さの考慮として応力降下量（および短周期レベル）を「1.5 倍または 20MPa の大きい方」に設定することとし,「特に応力降下量が 20MPa 以下のサイトは適切性について再点検が必要」と注意している [10]．ここでも，原子力安全規制は後追いでしかなかった．そして，2011 年 3 月には決定的で致命的な「先行規制の遅れ・失敗」を経験してしまうのである．このような経験を二度と繰り返してはならない．

2008 年岩手・宮城内陸地震は「震源を特定せず策定する地震動」の 16 地震のうちの一つに挙げられたが，一関西 (いちのせきにし) における表 5 の極めて大きな地震観測記録（地表で 4,022 ガル，地中で 1,078 ガル）[3]が採用された原発は未だにない．一

[2]東京電力や独立行政法人 原子力安全基盤機構 JNES の解析によれば，震源特性の要因で約 1.5 倍，深部地盤構造の伝播経路特性で約 2 倍，敷地下の古い褶曲構造などサイト (地盤) 特性で約 2 倍，合計約 6 倍に増幅されたという [40].

[3]入倉ら [17] は，P 波速度を 1/2 以下に小さくして短周期地震波を大きくし，Q 値を「劇的に小さく」して振幅を抑え，上下動の非対称性についてトランポリン効果等を考えれば，極めて大きな地表地震動の生成メカニズムを一応説明できるとしている．しかし，地中で 3 成分合成最大加速度は 1078gal に達し，上下動の最大速度は 68.5cm/s で水平動 42.2cm/s(EW)

関西の地中地震計は深さ 260m，S 波速度 1,810m/s の固い岩盤に設置されており，表 1 の若狭の原発の解放基盤表面位置のせん断波 (S 波) 速度と同等と言える．地中観測記録の応答スペクトルを 2 倍にした解放基盤表面はぎとり波相当の応答スペクトルは図 32 の通りであり，NS 方向で 2,000 ガルにもなる．泊原発の審査（2015 年 3 月）でようやくこの地震観測記録が検討されたが，図 32 の一関西以外の観測点での 1/4 以下の小さな観測記録が採用されようとしている．その理由は「IWTH25（一関西）については，トランポリン効果，ロッキング振動の要因や大加速度が発生した要因を特定するため，地盤構造等の調査，調査結果を踏まえたはぎとり解析，および震源特性を踏まえた検討が必要である．それらの検討には相応の期間が必要であり，現時点で信頼性の高い基盤地震動の評価は困難である.」[12] というものである．しかし，地表記録はともかく，解放基盤表面相当の固い岩盤に設置された地中地震計による地中記録にはトランポリン効果やロッキング振動による影響は見られない．2008 年 6 月 14 日の強震動観測から 7 年以上が経つのに，一向に調査・解析が進まない．「調査・解析を進めないことが利益になるからサボタージュしている」としか思えないのである．震源近傍でせっかく取れた貴重な地震観測記録がこのような形で生かされないままお蔵入りにされるのであれば,「地震観測記録が新たに取れれば，震源を特定せず策定する地震動の考慮対象に組み入れる」と原子力規制委員会・原子力規制庁がいくら強調しても，説得力はない.「大きすぎる地震動は考慮しない」という方針を採っているとしか思えないからである．

断層モデルの平均像における地震動の過小評価とその原因については，すでに述べたとおりだが，松田式の適用や修正レシピなどでこの平均像における過小評価が是正されたとしても，平均像からの偶然変動のバラツキを保守的に考慮する必要性が依然として残されている．これを定量的に評価するためには，実際の地震観測記録と断層モデルによる地震動評価結果をつきあわせて評価する以外にない．たとえば，2008 年岩手・宮城内陸地震の震源断層の長さと幅だけが分かっているとして，一関西の地中観測点での地震動評価を断層モデルで行い，地中観測記録と比較するのも一つの方法である．このような比較検討ができないのであれば，耐専スペクトルと同様に，少なくとも 2 倍の偶然変動を考慮すべきである．たとえば，要素地震の振幅を「平均像における不確実さ（地域性）の考慮」からさらに少なくとも 2 倍にする（巻末注 6）などして断層モデルによる地震動評価をやり直すべきである．

高浜 3・4 号と大飯 3・4 号の基準地震動はもとよりクリフエッジをもはるかに超える地震動が実際に起きている．このような地震動が実際にこれらの原発を襲うことになれば，炉心溶融事故を避けることはできないであろう．福島第一原発事故を経験してもなお「後追い規制」を続けることは，もはや許されない．

4　結言

本意見書では，高浜 3・4 号と大飯 3・4 号の基準地震動を精査し,「震源を特定せず策定する地震動」と「震源を特定して策定する地震動」のいずれにも重大な過小評価があることを明らかにした．その要旨は以下の通りである．

（1）「震源を特定せず策定する地震動」として，「2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動」が採用されている．ところが，この留萌支庁南部地震においては，地震計の設置不足を補うため，地域地盤環境研究所が震源断層モデルを用いて地震観測点以外の震源域内での地震動を再現解析しており，その最大値は地震観測記録の 1.8 倍になる．これを考慮すれば，留萌支庁南部地震を考慮した地震動は 1,100 ガル程度になり，高浜 3·4 号のクリフエッジ 973 ガルを超える．さらに，原子力安全基盤機構（現在は原子力規制庁）は国内の地震観測記録を反映した独自の断層モデルによる地震動解析を行い，M6.5 の横ずれ断層で 1,340 ガルの地震動が起こることを明らかにしている．これを採用すれば，高浜 3·4 号だけでなく，大飯 3·4 号のクリフエッジ 1,260 ガルをも超える．

の 1.5 倍を超えた．しかも，地表記録で見られた上下動の非対称性（トランポリン効果）は地中記録には見られない．この生成原因については不明なままである．

（２）「震源を特定して策定する地震動」は，基本的に「FO-A～FO-B～熊川断層」の地震動評価に基づいている．高浜 3·4 号で 700 ガルの基準地震動 Ss-1 を規定しているのは耐専スペクトルによる地震動評価だが，最近 20 年間の震源近傍での地震観測記録は反映されておらず，現在見直し作業中であり，改定後の耐専スペクトルを用いるべきである．また，耐専スペクトルは平均的な応答スペクトルにすぎず，地域差以外の偶然変動によるバラツキをも考慮すれば少なくとも 2 倍の余裕を持たせるべきである．そうすれば 1,300 ガル以上になり，クリフエッジを超える．高浜 3·4 号における断層モデルによる評価は耐専スペクトルによる評価の 1/2 以下と小さく，明らかに過小評価であり，断層モデルの欠陥を示唆している．

大飯 3·4 号では，断層との距離が近すぎるという理由で耐専スペクトルは適用されていないが，関西電力の示した耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係図から 1,200 ガル以上になる．また，大飯 3·4 号と高浜 3·4 号の断層モデルによる地震動評価には 2 倍の差があり，大飯 3·4 号で耐専スペクトルが適用されれば，高浜 3·4 号における 700 ガル弱の 2 倍になって当然であり,「適用外」とする根拠に乏しいことを示唆している．さらに，耐専スペクトルにおける偶然変動などの少なくとも 2 倍のバラツキを考慮すれば 2,400 ガル以上になる可能性もある．これは，原子力安全基盤機構の独自の断層モデルによる地震動解析結果とも一致しており，2008 年岩手・宮城内陸地震の地中地震計による 1,078 ガル（3 成分合成，基準地震動と同じ解放基盤表面はぎとり波相当で 2,000 ガル）の地震観測記録等とも整合している．

つまり,「震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」のいずれにおいても地震動が過小評価されており，最新の知見に基づいて基準地震動を保守的に設定し直せば，高浜 3·4 号と大飯 3·4 号のいずれにおいてもクリフエッジを超えることは避けられない．

以上の知見の多くは，原子力規制委員会･原子力規制庁にも伝え，議論してきたところである．原子力規制庁は，原子力安全基盤機構の断層モデルについて検討する必要性を 2015 年 1 月に認めながら未だに検討していない．耐専スペクトルが見直し作業中であると知りつつ，古いまま使っており，バラツキを考慮しようともしていない．断層モデルによる地震動過小評価についても「手法の違い」によると居直っている．ところが，前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏は任期切れ退職後の学会で，今の断層モデルのレシピでは地震動が過小評価されると批判している．福井地裁での大飯判決・高浜仮処分決定を受け，また，行政の立場から学者の立場に変わって，発言しやすくなったのであろう．しかし，行政が最新の知見を無視し，保守的評価を怠っているとき，行政に追従するのではなく,「それは重大な瑕疵だ」と指摘する責任と勇気が求められているのではないだろうか.

（注 1） 原発における重要施設の固有周期について

主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期は表 6 に示すとおり，0.18～0.47sec である．また，表 7 のように，原子炉格納容器は PWR で 0.214sec，BWR で 0.444sec と BWR のほうがやや大きいが，主要な機器・配管の固有周期は，PWR と BWR で大差はなく，0.031～0.144sec である．これより，排気筒など細長い構築物以外は，原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期は，0.03～0.5sec の範囲にあり，原子力発電所の耐震性を評価する上では，この短周期側での評価が重要だと言える．

大飯・高浜・美浜原発についても，主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期は，表 8 に示すとおりであり，この範囲が重要であることがわかる．ただし，これらの固有周期は原子炉設置許可申請書等に記載された新設時のものであり，設計通りに施工され，腐食・減肉や応力腐食割れなどによるひび割れがないことが前提である．これらの老劣化現象が伴えば，当然，固有周期は変わる．

また，原子力発電所の大型機器や配管類は元々固有周期が長いのだが，サポートを多数設置することで無理矢理短周期にしているため，このサポートが地震動などで破断もしくはサポート機能喪失が起きると，固有周期は長くなる．固有周期が長くなると，地震動による応答 (応答速度や応答加速度等) が大きくなり，一層破壊が進む．ひどい場合にはこの繰り返しが一挙に生じて，カタストロフィックに大破断もしくは大変形を起こし，安全機能が失われることになる．

さらに，大きな地震動では建屋・構築物が弾性限界を超えて変形するため「非線形効果」と呼ばれる現象が生じ，床応答スペクトルの特性が変わり，それに伴って施設の応答速度や応答加速度も変わる．

表 6: 主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期（水平南北 NS 方向，東西 EW 方向）[sec]

PWR 原発	NS	EW	BWR 原発	NS	EW
泊 1	0.191	0.226	女川 1	0.244	0.234
泊 2	0.191	0.226	女川 2	0.207	0.203
美浜 1	0.250	0.250	福島第二 1	0.424	0.423
美浜 2	0.240	0.240	福島第二 2	0.458	0.460
美浜 3	0.278	0.280	福島第二 3	0.468	0.473
高浜 1	0.293	0.293	福島第二 4	0.469	0.472
高浜 2	0.293	0.293	柏崎刈羽 1	0.441	0.441
高浜 3	0.226	0.223	柏崎刈羽 2	0.431	0.431
大飯 1	0.185	0.185	柏崎刈羽 3	0.433	0.434
大飯 2	0.185	0.185	柏崎刈羽 4	0.467	0.467
大飯 3	0.212	0.214	柏崎刈羽 5	0.402	0.402
大飯 4	0.214	0.214	柏崎刈羽 6	0.444	0.433
伊方 1	0.236	0.236	柏崎刈羽 7	0.443	0.432
伊方 2	0.184	0.184	浜岡 1	0.250	0.247
伊方 3	0.211	0.193	浜岡 2	0.257	0.256
玄海 1	0.234	0.234	浜岡 3	0.278	0.276
玄海 2	0.265	0.265	浜岡 4	0.279	0.278
玄海 3	0.221	0.230	志賀 1	0.201	0.203
玄海 4	0.214	0.216	島根 1	0.250	0.240
川内 1	0.304	0.304	島根 2	0.229	0.211
川内 2	0.298	0.298	東海第二	0.451	0.452
敦賀 2	0.215	0.216	敦賀 1	0.213	0.213

表 7: 原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期の典型例 [sec]

PWR(例) の代表機器名	固有周期
原子炉容器	0.055
使用済燃料ラック	0.042
制御棒駆動装置	0.063
ほう酸タンク	0.078
余熱除去冷却器	0.037
海水ホンプ	0.050
原子炉補機冷却水冷却器	0.041
格納容器スプレイ冷却器	0.037
原子炉格納容器（PCCV）	0.214
BWR(例) の代表機器名	**固有周期**
原子炉圧力容器	0.085
使用済燃料貯蔵ラック	0.092
制御棒駆動系水圧制御ユニット	0.043
高圧炉心注水系ポンプ	0.036
残留熱除去系熱交換器	0.032
残留熱除去系ホンプ	0.035
原子炉補機冷却水系熱交換器	0.036
原子炉補機冷却海水ポンプ	0.144
主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ	0.031
可燃性ガス濃度制御系再結合装置	0.049
原子炉格納容器	0.444

（注 2） 耐専スペクトルの適用範囲について

2000 年鳥取県西部地震 (M7.3) において，震源断層のほぼ直上にある賀祥ダム ($X_{\mathrm{eq}} = 6$km) で地震観測記録が取れている．このダムは震源断層に接近しており，耐専スペクトルの等価震源距離 X_{eq} が極近距離よりかなり小さく，電力会社の基準によれば「適用範囲外」になるところである．ところが，その地震観測記録は，図 16 のように，耐専スペクトル (内陸補正有) によく適合している．

この点については，2009 年の意見交換会 [41] でも，原子力安全委員会の釜江克宏耐震安全性評価特別委員会委員は賀祥ダムのデータに基づき,「そういうところでもまあまあ使えるというような，それは個別の話だと思うのですけれども．そういう，これは少し科学的な根拠があると思うのですけれども，そういうものが出てくれば，それを我々は受け入れて，それを基に最終的には個別に審査すべきだと思いますので．あの黄色 (引用者注：適用範囲外の領域) が全くデータがないからだめという話でも私はないような気がする.」と発言し，入倉孝次郎委員長も同意していた．

表 8: 大飯・高浜・美浜原発の主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期 [sec]

対象設備（項目）	大飯 3·4 号	高浜 3·4 号	美浜 3 号
原子炉容器（支持構造物）	0.055	0.052	0.065
蒸気発生器（支持構造物）	0.07	0.063	0.141
炉内構造物（炉心そう）	0.055	0.052	0.065
一次冷却材管（本体）	0.07	0.063	0.141
余熱除去ポンプ（基礎ボルト）	≤0.05	≤0.05	≤0.05
余熱除去設備配管（本体）	0.09	0.082	0.102
原子炉格納容器（本体）	0.223	0.160	0.179
原子炉建屋（外周遮蔽建屋）	0.223	0.206	0.273
制御棒クラスタ駆動装置	0.065	0.065	0.218
ガイドチューブ	0.036	0.036	0.065
燃料集合体	0.263	0.323	0.345
制御棒挿入時間 (許容値)	0.55	0.64	0.64

(出典：関西電力株式会社「柏崎刈羽原子力発電所で観測されたデータを基に行う美浜発電所，高浜発電所及び大飯発電所における概略影響検討結果報告書」(2007.9.20))

（注 3） 断層モデルによる地震動過小評価について

断層モデルによる「地震規模」の過小評価

「断層モデルのレシピ」とは地震調査研究推進本部地震調査委員会（以下「推本」と略す）の作成した「震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」)」[19, 21] のことをさす．断層モデルのレシピはいくつも提案されているが,「入倉レシピ」[14, 15] などと特に呼ばない場合には推本のレシピをいう．同地震調査委員会が，2002 年に糸魚川－静岡構造線断層帯の断層モデル [18] を作成して以降，国内計 14 の活断層に対して種々の断層モデル設定法を検証し，2005 年に最初の「全国を概観した地震動予測地図」報告書を作成し，その別冊に「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」[19] としてまとめたのが最初である．

この「『レシピ』は，震源断層を特定した地震を想定した場合の強震動を高精度に予測するための,『誰がやっても同じ答えが得られる標準的な方法論』を確立することを目指しており，今後も強震動評価における検討により，修正を加え，改訂されていくことを前提としている.」[19] この考え方に基づき，推本は 2005 年以降，全国地震動予測地図・全国を概観した地震動予

測地図をほぼ毎年作成し公表しているが，そのたびにレシピも改訂してきた．2009 年 12 月 21 日改訂版 [21] が最新のレシピである．

中でも，2008 年 4 月 11 日の改訂 [20] は断層モデルのパラメータ設定に本質的な修正を加えたものである．推本による活断層長期評価では活断層の長さから松田式 [30]（注 2 参照）を用いて将来起こりうる地震の規模を推定していたが，レシピの断層モデルでは断層面積から地震規模を推定しており，これが松田式による地震規模と比べて 1/5〜1/2 に過小算定されるという問題点があった．しかし，松田式による地震規模をそのままレシピに適用すると，地震動評価結果が非常に大きくなるため，現実の震源断層とは別に仮想モデルとして断層幅や断層長さを長くし，断層面積を少し増やしてレシピを適用するという折衷的なモデル設定法を追加したのである．以下ではこれを「修正レシピ」とよぶ．

まず，断層モデルのレシピ自身に含まれる問題点について述べる．

表 9 に「FO-A〜FO-B 断層 (上端深さ 3km の基本ケース)」の震源断層に対する断層パラメータを示す．推本の活断層長期評価では，断層長さ $L = 35.3$km から松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ を使って地震規模が M7.4(気象庁マグニチュード) と算定され，断層モデルのレシピからは，断層面積 $S = 529.5\text{km}^2$ から次式の下段の式を使って地震モーメント $M_o = 1.56 \times 10^{19}$N·m（M7.2 相当）が求められる．

$$S = \begin{cases} 2.23 \times 10^{-15} M_0^{2/3}, & M_o < M_{ot}; \\ 4.24 \times 10^{-11} M_0^{1/2}, & M_o \geq M_{ot}, \end{cases} \tag{1}$$

ただし，この式での M_o の単位は dyn·cm，1N·m= 10^7dyn·cm, である．M_{ot} は，断層幅 W が断層長さ L に等しくなり，これ以上の地震規模では断層幅が変らない飽和状態 $W = W_{\max}$ になる地震モーメントの値であり，レシピでは $M_{ot} \equiv 7.5 \times 10^{25}$ dyn·cm= 7.5×10^{18} N·m とされている．

表 9 に示すとおり，松田式による M7.4 は地震モーメントで $M_o = 2.39 \times 10^{19}$N·m に相当し，断層モデルによる地震規模は地震モーメントの値で 65%にすぎない．これでは震源断層から 65%のエネルギーしか放出されないことになり，地震動は大きく過小評価されてしまうのである．

なぜこうなるのかというと，Somerville et al.(1993) [37] が指摘したように日本国内の地震データと北西アメリカのデータでは断層パラメータに大きな差があるからである．レシピの元になったデータは入倉ら (2001)][14] の図 33 に示されるデータである．入倉らの地震データは，(a) Somerville et al.[38] による 15 地震 (米カリフォルニア 10 地震，米アイダホ 1 地震，カナダ 2 地震，イラン 1 地震，日本 1 地震で，ほとんどが北米大陸の地震)，(b) Miyakoshi(2001 私信) のデータセット，(c) Wells and Coppersmith(1994) による 244 地震 (半数近くは米の地震，1 割程度が日本の地震) の 3 種類からなる．データ数は多いが，$M_{0t} \leq M_0$ となるデータの大半は (c) のデータであり，武村 [39] は，Wells and Coppersmith(1994) が別のデータセットに対して求めた $L - M_0$ 回帰式を図 36 の点線で示し，これを 2 つの実線と比較した結果,「Wells and Coppersmith(1994) が求めた断層パラメータ間の関係は日本列島の地殻内地震には適用できないようである」[39] と断じている．

$S - M_0$ 関係を示す図 33 の一点鎖線は

$$\log_{10} S = \begin{cases} \dfrac{2}{3} \log_{10} M_0 - 14.74, & M_0 < M_{0t}; \\ \dfrac{1}{2} \log_{10} M_0 - 10.71, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \tag{2}$$

または，

$$S = \begin{cases} 1.82 \times 10^{-15} M_0^{2/3}, & M_0 < M_{0t}; \\ 1.95 \times 10^{-11} M_0^{1/2}, & M_{0t} \leq M_0. \end{cases} \tag{3}$$

と表される武村の式であり，図 36 に示される日本国内の地震データから導かれたものである．具体的には，佐藤編著による「日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」[33] で体系的に整理された地震データの 33 の内陸地殻内地震を使っている．図 33 の入倉式（太い破線) と武村式 (一点鎖線) を比べると武村式の方が下方にあり，同じ断層面積でも地震規模に大きな差があることが明らかである．

武村の $S - M_o$ 関係式は，最初に図 36 の国内地震データに対して $L - M_o$ 回帰式を

$$\log_{10} L = \begin{cases} \dfrac{1}{3} \log_{10} M_0 - 7.28, & M_0 < M_{0t}; \\ \dfrac{1}{2} \log_{10} M_0 - 11.82, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \tag{4}$$

と導き，国内データでは断層幅が

$$W = \begin{cases} \dfrac{2}{3} L, & M_0 < M_{0t}; \\ 13, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \tag{5}$$

となることを利用している．つまり，断層長さが断層幅以上に長く，$M_o \geq M_{ot}$（M6.8 程度以上) の地震をもたらす飽和断層における断層幅の平均値は国内データで 13km であり，入倉ら (2001) の北米中心の地震データの 16.6km より小さいのである．

武村の L−M_o 関係式 (4) は，Shimazaki(1986)[35] が日本列島周辺の地殻内地震の断層長さ L と M_0 の関係を調べて

$$\log_{10} L = \begin{cases} 0.281 \log_{10} M_0 - 5.98, & M_0 < M_{0t}; \\ 0.524 \log_{10} M_0 - 12.44, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \tag{6}$$

の関係式を導き，$M_0 < M_{0t}$ では $M_0 \propto L^3, M_{0t} \leq M_0$ では $M_0 \propto L^2$ のスケーリング則が成り立つと結論づけたことによっている．つまり，武村は，このスケーリング則が図 36 の国内地震データに対しても成り立つと仮定して式 (4) を導いているのであり，両式で大差はない．

他方，松田式 $\log_{10} L = 0.6$M−2.9 に M−M_o 換算式 M= $(1/1.17)(\log_{10} M_o$[N·m]−10.72) を適用すると，$\log_{10} L = 0.513 \log_{10} M_0 - 11.99$ が得られる．この式は

表 9: FO-A～FO-B 断層のパラメータ (上端深さ 3km の基本ケース）[25, 27, 28]

断層パラメータ		断層モデルで M7.2 とした場合		松田式で M7.4 とした場合	
		A 法（関電）	$S_a/S = 0.22$ 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法
断層長さ L		35.3km (松田式では M7.4 相当)			
断層幅 W		15km			
断層面積 $S = LW$		529.5 km^2			
断層上端深さ		3 km			
断層下端深さ		18 km			
破壊開始点		アスペリティ下端 4 種類＋断層下端南北 2 種類			
破壊伝播方式		同心円状 (放射状)			
地震モーメント M_0		1.56×10^{19} N·m		2.39×10^{19} N·m	
マグニチュード		M7.2，M_W6.7		M7.4，M_W6.9	
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		84.2 cm		128.9 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.5×10^{10} N/m^2			
S 波速度 V_s(または β)		3.6 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.59 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{3/2}$		3.1 MPa		4.8 MPa	
短周期レベル A		1.32×10^{19} N·m/s^2		1.53×10^{19} N·m/s^2	
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$		1.09 sec		1.26 sec	
アスペリティ全体	面積 S_a	131.27 km^2	116.49 km^2	231.64 *1	116.49
	地震モーメント M_{0a}	7.77×10^{18} N·m	6.90×10^{18}	2.10×10^{19} *1	1.06×10^{19}
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	12.6 MPa	14.2 MPa	10.9 *1	21.7
	平均すべり量 D_a	169.2 cm	169.2 cm	259.0	259.0
アスペリティ大	面積 S_{a1}	87.51 km^2	77.7 km^2	154.4	77.7
	地震モーメント M_{0a1}	5.74×10^{18} N·m	5.09×10^{18}	1.55×10^{19}	7.80×10^{18}
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1}$	12.6 MPa	14.2 MPa	10.9	21.7
	平均すべり量 D_{a1}	187.5 cm	187.5 cm	287.1	287.1
アスペリティ小	面積 S_{a2}	43.76 km^2	38.8 km^2	77.2	38.8
	地震モーメント M_{0a2}	2.03×10^{18} N·m	1.80×10^{18}	5.48×10^{18}	2.76×10^{18}
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2}$	12.6 MPa	14.2 MPa	10.9	21.7
	平均すべり量 D_{a2}	132.6 cm	132.6 cm	203.0	203.0
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	398.23 km^2	413.01 km^2	297.86	413.01
	地震モーメント M_{0b}	7.82×10^{18} N·m	8.70×10^{18}	2.88×10^{18} *1	1.33×10^{19}
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.8 MPa	2.2	4.3
	平均すべり量 D_b	56.1 cm	60.2 cm	27.6 *1	92.2
Q 値		$50f^{1.1}$			
高周波限界遮断周波数 $f_{\max}$		8.3Hz			

注：「A 法」とは短周期レベルからアスペリティ総面積を求める方法で，「$S_a/S = 0.22$ 法」とはアスペリティ総面積を断層面積の 22 %に固定する方法である．A 法では，断層面積が大きくなるほどアスペリティ面積の全断層面積との比 S_a/S が大きくなり，応力降下量が小さくなる．そのため，地震調査研究推進本部のレシピでは，長大な断層に関しては $S_a/S = 0.22$ 法を用いるように推奨し，「内陸地震によるアスペリティ総面積の占める割合は，断層総面積の平均 22% (Somerville et al., 1999)，15%～27% (宮腰・他, 2001) であり，拘束条件にはならないが，こうした値も参照しておく必要がある.」としている．関西電力は $S_a/S > 0.30$ で $S_a/S = 0.22$ 法を使う方針だが，根拠に乏しい．

*1：地震規模を M7.4 にすると，A 法ではアスペリティ面積が 231.64km^2（断層面積の 43.7%）となり，大きすぎる．そのため，アスペリティ平均応力降下量が 10.9MPa とかなり小さくなり，背景領域の地震モーメントや平均すべり量も非常に小さい．このような場合にアスペリティ面積を断層面積の 22%に固定する方法が $S_a/S = 0.22$ 法であり，応力降下量は 21.7 MPa と大きめだが，実際に起きている M7 クラスの地震では 20～30MPa になる例も多いことから妥当と言える．

関西電力は断層面積から地震規模 M7.2 を求めているため，地震規模が小さく算定されてしまい，関西電力による A 法ではアスペリティ面積が 131.27km^2（24.8%）と比較的大きくなり，アスペリティ平均応力降下量は 12.6MPa に留まる．$S_a/S = 0.22$ 法では 14.2MPa とやや大きくなるが，断層面積から地震規模を小さく算出しているため，松田式で M7.4 とした場合の 21.7MPa には届かない．

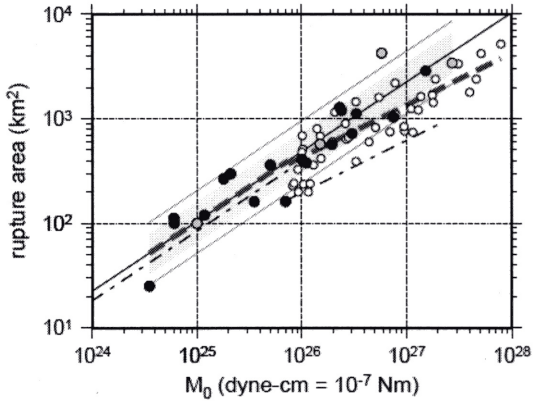


図 33: 断層面積 S(rapture area) と地震モーメント M_0 の関係 [14]（破線がレシピの式に相当，入倉らは $L = 20$km で $W_{max} = 16.6$km に達すると仮定し，分岐点を $M_0 = 7.5 \cdot 10^{25}$dyn·cm としている．一点鎖線は 武村 (1998) による $W_{\max} = 13$km とした関係式で分岐点の M_0 は同じ）

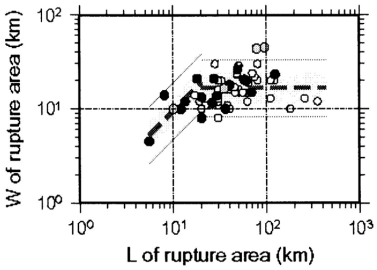


図 34: 入倉ら [14] による $L - W$ の関係 (○は Well et al.(1994)($M_{0t} < M_0$), ●は Somerville et al.(1999) および Miyakoshi(2001)，灰色の○は低角逆断層のデータ)

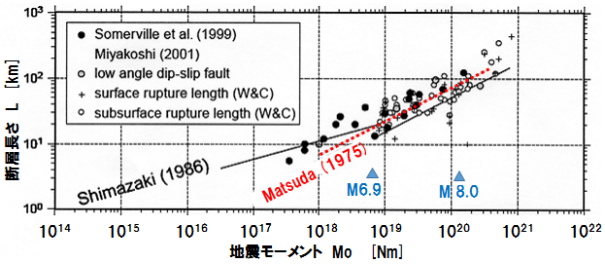


図 35: 断層長さ L(rapture length) と地震モーメント M_0 の関係 [14]（赤点線が松田式）

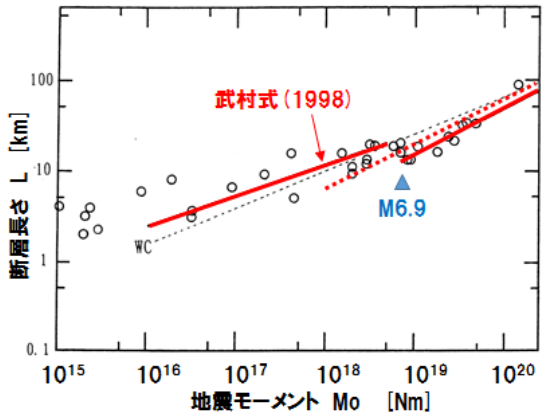


図 36: 武村 [39] による $L - M_0$ の関係（赤点線で松田式を加筆）

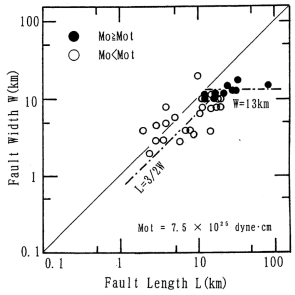


図 37: 武村 [39] による $L - W$ の関係

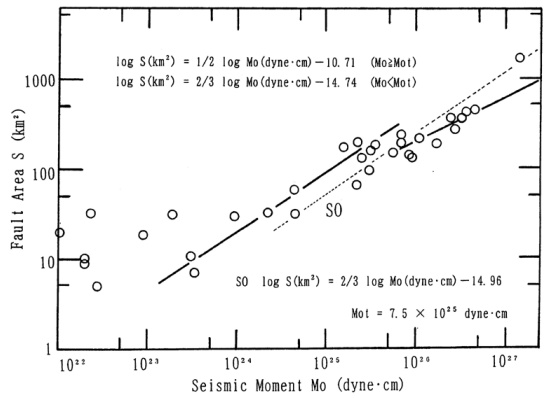


図 38: 武村 [39] による $S - M_0$ の関係

入倉ら [14] も導いており，図 35 に示される $L - M_0$ 図上で「Shimazaki(1986) の関係式とほぼ並行でかつ Wells and Coppersmith(1994) によってコンパイルされたデータをほぼ満足しているようにみえる」と指摘している．つまり，震源断層の長さと地震規模の関係を表す松田式は日本国内の地震データだけでなく，北米中心の地震データに対しても成り立つのである．ところが，国内と海外では断層の平均幅が大きく異なるため，断層面積と地震規模の関係を求めると大きく食い違ってくるのである．

この食い違いについて最初に問題提起したのは，Somerville et al.(1993)[37] であり，武村 (1998)[39] が続いた．入倉ら (2001) も「断層長さや幅を求めるときの定義の違いかあるいは日本周辺の地域性によるものか，今後の検討が必要とされる．」[14] と提起している．

Somerville et al.(1993)[37]（入倉も共著者）は北西アメリカの 12 の地震データと日本国内の 8 の地震データからそれぞれに対して $S - M_o$ 関係式を導き，両者の違いを次のように記している．「日本の地殻内地震の断層面積は北西アメリカの地震の 0.53 倍であり，平均すべり量は 1.86 倍大きく，対応する日本の地殻内地震の静的応力降下量は平均で北西アメリカの地震の 2.6 倍大きい．日本の Slip Constant Ratio の平均は 1.57 であり，アスペリティの破壊面積の合計は断層全体の面積の 42%を平均で示している．北西アメリカではそれぞれ 1.875 と 26%である．このことは日本の地殻内地震はすべり量のコントラストが小さいアスペリティで，より広い領域が覆われていることを示す．

アスペリティの絶対面積は日本の地震と北西アメリカの地震で大きな差はない．すなわち，日本の地殻内地震は北西アメリカの地震とほぼ同じ大きさのアスペリティを持っているが，すべり量の小さい領域は少ない．つまり，破壊領域全体の面積は小さい．すべり継続時間は平均して，3.6 倍日本の地殻内地震のほうが北西アメリカの地震より大きい．しかし，すべりモデルを求めたインヴァージョン解析に固有周期 6 秒の気象庁 1 倍強震計の変位記録を用いていることに注意が必要である.」[37]

断層モデルのパラメータ設定法は経験式に基づいており，どの地震データに依拠するかで経験式が異なってくる．Somerville et al.(1993) は，日本国内の地震データと北西アメリカの地震データをつきあわせることで，その違いを明確に記述し，今後の検討が必要であることを示唆していたのである．断層モデルがもてはやされる現在だが，20 年前にすでにその問題点が指摘されていたと言える．当時は国内地震観測記録も少なかったが，1995 年の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災を契機に強震観測計の全国ネットワークが構築されるに伴い，M7 クラスの地震観測記録が次々と収集され，震源近傍の観測記録さえ入手され始めた．ところが，国内地震データで断層モデルを再構築する動きは地震関連学界では見られない.「すでに構築」された断層モデルの「体系」を崩すことにつながることが懸念されるからかもしれないが，重大事故につながる可能性の高い原発の耐震設計で矛盾を知りつつ地震動を過小評価し続けることは許されない．

推本ではこの問題に対して松田式で地震規模を求め，震源断層の断層モデルをそれに合わせて修正する「修正レシピ」][20] を用いることで対処しようとしている．しかし，関西電力をはじめどの電力会社も修正レシピを用いようとはせず，地震規模を過小評価する旧来の断層モデルをそのまま使って地震動を過小評価し続けている．

推本の修正レシピも決して科学的とは言えないし，断層面積を非現実的に拡大しすぎることにより，地震動を過小評価している可能性もある．最も科学的な方法は，これらの国内地震データを集約して，日本国内に適用できる断層モデルの設定法を日本独自に開発することである．それができるまでは，推本の活断層長期評価で行っているように，断層長さから松田式で地震規模を求めて断層モデルのレシピを適用するか，少なくとも，推本の修正レシピで地震動評価をやり直すことが必要である．

ちなみに，2006 年の中央防災会議第 26 回「東南海，南海地震等に関する専門調査会」では，国内の主要活断層に対し，将来起こりうる地震の規模を推定するため各種推定式を適用して図 39 の結果を得ている [4]．地震規模はモーメントマグニチュード $\mathrm{M_W}$ で示されているが，どの活断層においても，武村 (断層面積)，武村 (断層長さ)，Shimazaki，Fujii-Matsu'ura，Irikura et al.(入倉式) の順で地震規模が小さくなり，断層モデルのレシピで使われている入倉式で最も小さい地震規模になることは明白である．同専門調査会では推定結果

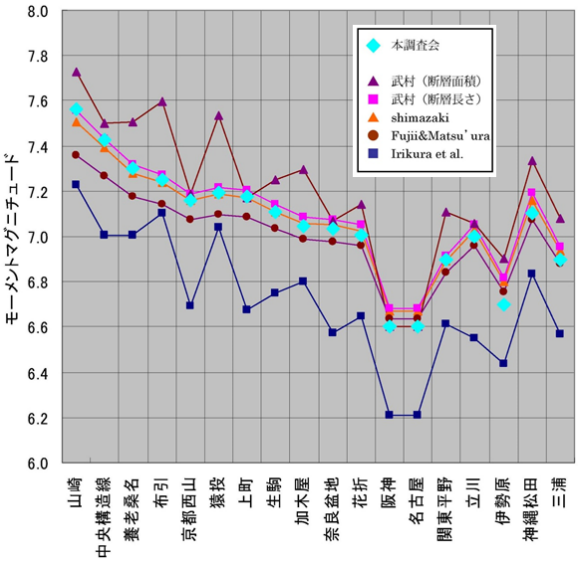


図 39: 中央防災会議東南海，南海地震等に関する専門調査会で検討された国内活断層に対する各種地震規模推定式とその評価結果 [4]

がこのように非常にばらついていたため，独自に回帰式を作成し，◊ で示される関係式を導いている．具体的には，断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6\mathrm{M} - 2.9$ で地震規模 (気象庁マグニチュード M) を求め，国内地震データのモーメントマグニチュード $\mathrm{M_W}$ と M の関係式 $\mathrm{M_W} = 0.88\mathrm{M} + 0.54$ を求め，$\log_{10} M_o = 1.5\mathrm{M_W} + 9.1$ で地震モーメントに変換している．当然のことではあるが，国内地震データに回帰させているため，同専門調査会の推定結果は武村 (断層長さ) や Shimazaki の結果とほぼ同じである．

断層モデルによる「応力降下量」の過小評価

断層モデルのパラメータは震源断層全体の特性を表すマクロなパラメータと，強い固着領域（アスペリティ）の特性を表すミクロなパラメータで構成される．マクロなパラメータのうち重要なものは，地震規模（地震モーメント M_o，気象庁マグニチュード M またはモーメントマグニチュード $\mathrm{M_W}$ 等で表す），断層面積 S，短周期レベル A および断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ である．断層平均すべり量 D は地震規模と断層面積から $M_o = \mu S D$（μ は剛性率）で自動的に求められる．また，アスペリティに関するミクロなパラメータで重要なのは，アスペリティ面積 S_a とアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ である．これらのうち，短周期地震動を評価する際に決定的に重要なパラメータは短周期レベル A と応力降下量 $\Delta\sigma$ および $\Delta\sigma_a$ である．これらが過小評価されれば，地震規模が大きく評価されたとしても，地震動は過小評価されてしまう．

断層モデルのレシピでは，円形破壊 (円形クラック) 面を仮定した次式で断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を求めている．

$$M_0 = \frac{16}{7\pi^{3/2}} \Delta\sigma S^{3/2}. \tag{7}$$

この式に式 (1) を適用すると，

$$\Delta\sigma = \begin{cases} 2.31, & M_o < M_{ot}; \\ 2.31\sqrt{\dfrac{S}{291}}, & M_o \geq M_{ot}, \end{cases} \tag{8}$$

が得られる．つまり，未飽和断層では，断層平均応力降下量は $\Delta\sigma = 2.31$MPa と一定になり，断層が飽和した後では，断層面積の平方根に比例する形で大きくなっていく[4]．

アスペリティの平均応力降下量を求める計算式は複数あり，その主なものが短周期レベル A による方法（A 法）とアスペリティ総面積を総断層面積の 22 %とする方法（アスペリティ総面積固定法または $S_a/S = 0.22$ 法）である．

「短周期レベル A[dyn·cm/s^2]」とは「強震動予測に直接影響を与える短周期領域における加速度震源スペクトルのレベル」のことであり,「A 法」では，まず，この値を次の経験式から求める．

$$A = 2.46 \cdot 10^{17} M_0^{1/3}. \tag{9}$$

続いて，r をアスペリティ総面積 S_a の等価半径，R を断層面積 S の等価半径，β を震源域における岩盤の S 波速度として，アスペリティ総面積 S_a を次式から求める．

$$S_a = \pi r^2, \tag{10}$$

$$r = \frac{7\pi M_0}{4AR}\beta^2. \tag{11}$$

ここでは，便宜的に震源断層とアスペリティの形状を円形と仮定しており，式 (11) はシングル・アスペリティモデルにおける M_0 と A に関する次の理論式から導出している．

$$M_0 = \frac{16}{7} r^2 R \Delta\sigma_a \text{（Boatwright1988）[2]}, \tag{12}$$

$$A = 4\pi r \Delta\sigma_a \beta^2 \text{（壇ほか 2001）[7]}. \tag{13}$$

したがって，式 (12) または式 (13) からアスペリティの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を逆算できる．ここで，式 (12) と式 (7) を組み合わせると，

$$\Delta\sigma_a = \frac{S}{S_a}\Delta\sigma \tag{14}$$

という単純な式が得られる．

関西電力は，表 9 のように,「FO-A～FO-B 断層のパラメータ (基本ケース)」の断層パラメータをこの A 法で求めている．その応力降下量は断層平均で $\Delta\sigma = 3.1$MPa, アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 12.6$MPa（アスペリティ面積比 $S_a/S = 0.248$）である．

ところが，A 法では，地震規模が大きくなるとアスペリティ総面積 S_a が大きくなりすぎてアスペリティの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ が小さくなりすぎる．そこで，断層モデルのレシピでは，長い断層で地震規模が大きい場合にはこの短周期レベルによる方法（A 法）は使わないよう警告している．それに代わる方法が「アスペリティ総面積固定法」であり，アスペリティ総面積 S_a を震源断層総面積 S の 22 %に固定する．この方法による断層パラメータの値が表 9 での「$S_a/S = 0.22$ 法」の列のパラメータ値であり，アスペリティ平均応力降下量は $\Delta\sigma_a = 14.2$MPa と少し大きくなる．この場合，アスペリティ面積比 S_a/S は A 法でも 0.248 に留まり，$S_a/S = 0.22$ 法の 0.22 と大差がなく，結果として応力降下量にも大差はない．

しかし，関西電力によるパラメータ値は地震規模を断層面積から M7.2 として求めたものであり，これを断層長さから松田式で M7.4 とした場合には,，表 9 のように応力降下量がそれぞれ $\Delta\sigma = 4.8$MPa および $\Delta\sigma_a = 21.7$MPa と 1.7 倍に跳ね上がる．

高浜原発における地震動評価で，耐専スペクトルと断層モデルとの間に 2 倍の差が見られた原因の一つは，ここにある．地震規模が過小評価された結果，応力降下量が過小評価され，地震動が過小評価される結果となったのである．

この関係は，FO-A～FO-B～熊川断層の場合にも現われる．表 4 の M7.7 とした場合が関西電力によるパラメータ値であり，松田式で M7.8 とした場合が右端の列の値である．この場合には，地震規模が大きいためいずれも $S_a/S = 0.22$ 法を用いている．関西電力による応力降下量は断層平均で $\Delta\sigma = 3.1$MPa, アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 14.1$MPa になり，M7.8 とした場合にはそれぞれ $\Delta\sigma = 5.8$MPa および $\Delta\sigma_a = 26.5$MPa と２倍近くへ跳ね上がる．その結果，耐専スペクトルと断層モデルとで 2 倍の開きが出たのである．

付言すると，断層モデルでは，短周期レベル A と応力降下量を 1.5 倍にしたケースも評価しており，一番大きな地震波になるのがこのケースである．この場合には，応力降下量は $\Delta\sigma = 3.1 \times 1.5 = 4.7$MPa および $\Delta\sigma_a = 14.1 \times 1.5 = 21.2$MPa になるが，地震規模を M7.8 とした場合からはほど遠い．

さらに付け加えると，関西電力は FO-A～FO-B～熊川断層の場合には，応力降下量についてだけは断層モデルのレシピで求めず，Fujii-Matsu'ura(2000)[8] の応力降下量を用いている．通常の断層モデルのレシピに従うと，表 4 の括弧書きのように $\Delta\sigma = 4.2$MPa と $\Delta\sigma_a = 19.0$MPa になるが，これをそれぞれ 3.1MPa および 14.1MPa に小さく設定しているのである．実は，このことによって関西電力は墓穴を掘っている．これをもう少し詳しく見てみよう．

長大な断層における「応力降下量」の過小評価

地震調査研究推進本部（推本）による断層モデルのレシピでは，円形破壊面を仮定できない「内陸の長大な横ずれ断層」に対しては，データも少なく未解決の研究課題だと指摘したうえで，Fujii-Matsu'ura が横ずれ断層を対象として導出した次式を図 40 の地震データに回帰させて得た値 $\Delta\sigma = 3.1$MPa を用いるよう推奨

[4]断層幅 W が地震発生層下端までの最大断層幅 $W_{\max}$ より小さい断層を「未飽和断層」といい，断層幅が地震発生層下端に到達して $W = W_{\max}$ のまま水平に長く伸びた断層を「飽和断層」という．

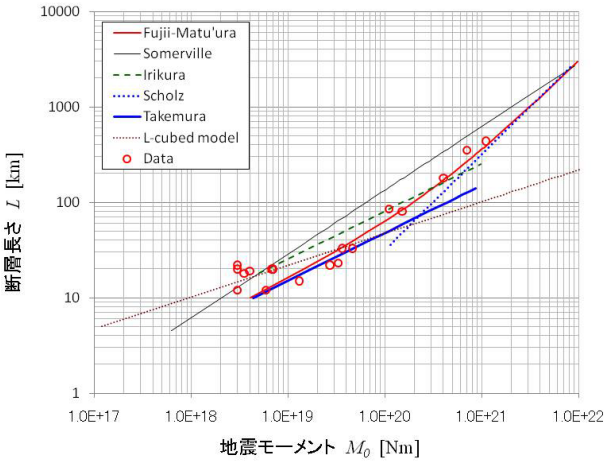


図 40: Fujii-Matsu'ura[8] 等によるスケーリング則の関係：Somerville(細線), 入倉 (Irikura, 緑破線), Scholz(青太点線), 武村 Takemura(青太直線), L3 乗モデル (茶細点線), Fujii-Matsu'ura(赤太曲線). Fujii-Matsu'ura は Takemura と Scholz に漸近し国内地震データ (赤丸) にフィットしている

している．

$$M_0 = \frac{WL^2}{aL+b}\Delta\sigma. \tag{15}$$

ただし，a と b は数値計算で得られる構造依存のパラメータであり，リソスフェアの厚さ＝ 30km，剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{10}$N/m^2 として $a = 1.4 \cdot 10^{-2}$，$b = 1.0$ を導いている．入倉 (2004)[15] はこの関係式を次のように論評している．

「Matsu'ura and Sato (1997) による『２次元のトランスフォーム・プレート境界での準静的なテクトニック・ローディングによる有限長の断層運動のシミュレーション』を用いて導かれたものである．従って，この式自体は３次元の断層場での地震発生の理論モデルとしては不十分なものである．ただし，観測データとして得られている $M_o - L$ 関係を説明するための経験的関係式として意味がある．式 (15) の物理学的な意味での有効性については，３次元の動力学モデルに基づく理論的検証および観測データに基づく検証の両面の検討が必要とされる.」

つまり，$M_o - L$ 関係が経験的に式 (15) で表されるということが重要であり，パラメータの値の妥当性については，動力学的シミュレーションや実際の地震データに基づいて検証すべきだというのである．Fujii-Matsu'ura は，上記のパラメータ値を用いて，$W = 15$km と設定し，地震データへの回帰計算で $\Delta\sigma = 3.1$MPa を導出しているが，その適用に際しては具体的な検証が必要なのである．

さらに，推本は 2010 年 11 月に出した「活断層の長期評価手法 (暫定版)」報告書 [22] の中で「長さが 100 km を超えるような長大な断層」(p.6) と明記しており，「FO-A～FO-B～熊川断層 63.4km」は「長大な断層」とは言えない．断層幅は $W = 15$km だが，剛性率は 3.5×10^{10}N/m^2 と小さい．したがって，Fujii-Matsu'ura モデルを適用する前に，応力降下量に関する国内地震データとの整合性を十分検討し，国内の地震動評価にそのまま適用できるかどうかについての慎重な検討が必要であろう．

それはさておき，より大きな問題がモデルそのものにある．Fujii-Matsu'ura[8][31] は断層幅より断層長さが十分長い中規模断層から長大断層を広く包含する $L - M_0$ 関係式 (断層長さ L と地震規模を表す地震モーメント M_0 の関係式) を「観測データに基づく回帰計算」から求めたものであり，応力降下量 $\Delta\sigma = 3.1$MPa はそれに付 随して得られた値に過ぎない．しかも，彼らの用いた地震データは図 40 の赤丸で示されるように，入倉らの用いた地震データとはかなり異なる武村のデータである．結果として，Fujii-Matsu'ura は中規模断層に対しては武村式（図 40 の青太実線），長大断層に対しては Scholz の式（図 40 の青点線）[34] に漸近するように $L - M_0$ 関係式（図 40 の赤太曲線）を導出している．Fujii-Matsu'ura に依拠するのであれば，彼らの $L - M_0$ 関係式が断層モデルのレシピで採用されている入倉式とは合わず，むしろ，松田式や武村式に合うということをはっきり認めるべきである．Fujii-Matsu'ura[8] の地震データが入倉らの北米中心の地震データとは全く異なることを直視し，国内の断層モデルでは国内の地震データに基づいた断層モデルのパラメータ設定法を採用すべきであることを認め，レシピの妥当性について根本から見直すべきである．少なくとも推本による修正レシピ，すなわち,「地震規模を松田式で求め断層面積を修正してレシピを適用する」方法を採用すべきである．

推本は，Fujii-Matsu'ura の断層平均応力降下量 3.1MPa およびアスペリティ平均応力降下量約 14.4MPa（推本のレシピ [20] では $S_a/S = 0.215$ で計算しており，14.1MPa ではない）について「既往の調査・研究成果とおおよそ対応する数値」[20] だとしているが，少なくとも M7 クラスの国内地震データと比べると小さすぎる．鳥取県西部地震 M7.3 (2000.10.6) では２アスペリティで平均応力降下量は 28.0MPa と 14.0MPa と評価され [13]，能登半島地震 M6.9(2007.3.25) では３アスペリティで 20MPa，20MPa および 10MPa[24], 新潟中越沖地震 M6.8(2007.7.16) では３アスペリティで 23.7MPa，23.7MPa および 19.8MPa[16], 岩手・宮城内陸地震 M7.2(2009.6.14) では２アスペリティで 17.0MPa と 18.5MPa[17] であった．これらを教訓として, アスペリティの応力降下量を 20～30MPa またはそれ以上に設定すべきであろう．

（注 4） 修正レシピによる地震動評価について

断層モデルの修正レシピ [20] を使うと通常のレシピと比べて応力降下量が大きくなるため，電力会社の中には修正レシピの適用には異論もあろうかと思われるので，参考のため，第 62 回原子力安全委員会地震･地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG3(2010.3.3) 速記録 [5] から，徳山委員の「地震の物理からいって，あまりストレスドロップを今後バーンと上げて，そういうのがアンリアレスティックだったらどうする」という質問に対する入倉孝次郎耐震安全性評価特別委員会委員長の発言を引用しておく．ただし，修正レシピ

はあくまで松田式に基づく地震調査研究推進本部による活断層評価との不整合に対する場当たり的な辻褄合わせにすぎず，本来なら日本国内の地震データに基づいて断層モデルのレシピを根本的に大改定する必要がある．したがって，修正レシピはそれまでのつなぎとしての意義しか持ち得ない．

○入倉耐特委委員長　私もそのとおり応力降下量を，レシピでいろいろ検討しているのでその範囲を逸脱して計算しても，安全のためにいいと言ってもあまり説得性がない．それで先ほどの 22km に納めようとすると問題があるということで，この背景の説明でよく分からなかった点があります．これは柏崎の時にもお願いしてやってもらったやつですが，地震調査委員会では長期評価と強震動評価．長期評価のいわゆる専門家というのは変動地形学であるとか，地質の専門家が評価しています．その変動地形や地質の専門家が地震規模を評価する時には．松田式しか今の点信頼出来るものがないということがあります．すると今回 22km ですね．22km を松田式を当てはめると，気象庁マグニチュードが 7.1 になる．それと 22km と地震発生層をモデル化して断層面積等でやると M_J7.1 にならないということがあります．そうすると同じ国の機関がやるのに，長期評価でやっているモデルと強震動でやっているモデルがずれがあるのはおかしいのではないかということで，それで長期評価の意見を活かして，気象庁マグニチュード 7.1 になるモデル化もしましょう．そうすると今，東原先生が言われた点ですね．地震発生層がある程度限られていると，地震発生層でないところがたくさん動くとするのは，やはり物理的におかしいのではないかということがあります．しかしながら実際には長さであるとか，幅に関してある程度のばらつきがあるから，ある程度は許容して，要するに気象庁マグニチュードが 7.1 をモデル化するモデル化の方法を，地震調査委員会は提案しています．その場合は長さもある程度長くして，幅も長くする。これは別に物理的意味があるわけではないけれども，計算上のものですということで，気象庁マグニチュード 7.1 のモデル化として，Ｌモデルというのと Wモデルで計算して下さい．そうすれば一応気象庁マグニチュードを実現する地震動の計算が出来ます．これが 3 ページの左側のモデルだと思います．実際には 22km と．これは変動地形とかそういう観点で 22km と決まっているのに，なぜこんなことをするのかというご意見はあると思いますが，気象庁マグニチュードを実現するためにはどうしてもこれをしないといけない．そうしないと今，徳山先生が言われたように狭いところに地震のエネルギーを閉じ込めないといけないということで，応力降下は非常に大きくなるということで，そうするとこれまでのいろいろな経験的な，地震の震源モデルの解析結果と大きくずれてしまうということがあるので，こういうふうにモデル化した．ですから，22km というふうに決まっているけれども，ここではそれを 25.7km にして，気象庁マグニチュード 7.1 を計算したらどうでしょうか．これは震源が特定出来る場合の計算です．震源を特定せずではないので先ほどの説明が震源を特定せずということを強調されたので，これは震源を特定して，かつ 22km なのに，なぜ M6.8 でいいんですかというご意見の方は当然おられると思います．そういう人たちに気象庁マグニチュードでやった場合にＭ 7.1 になるのなら，それで計算して比較してみましょう．これはやはり確認用の地震動として計算して，今徳山先生が言われるような考えで，応力降下量を無理やり上げるのではなくて，応力降下量は保存して，そのかわり長さ，幅は多少ばらつきの範囲内で動かすということで計算する．これは柏崎の時にも原子力安全委員会でお願いして，確認用地震動として計算していただいたものをここでもやっていただくということでよろしいのではないでしょうか．

（注 5） 松田式について

松田 (1975)[30] は活断層の長さ L（今日では「活断層の下に広がる震源断層の長さ」とされている）から将来起こりうる地震規模を $\log_{10} L = 0.6\mathrm{M} - 2.9$ で推定することを提案した．これが「松田式」であり，地震規模は気象庁マグニチュード M で表されている．もちろん、これは震源断層の長さから推定される地震規模の平均像であり，図 35 および図 36 のように，国内外の地震データに対して大きなバラツキを伴う．

この松田式は国内地震学界で広く用いられており，地震調査研究推進本部の地震調査委員会長期評価部会が 2010 年に活断層の長期評価手法」 報告書（暫定版）[22] を公表し,「3.4.5 活動時の地震の規模」(p.98) において，次のように明示している．

「①地震の規模は，気象庁マグニチュード（M ; 以下では単に「マグニチュード」と記す）で表す．②マグニチュードの大きさは 0.1 単位で表記する．③活断層の長さに基づき地震の規模を推定する場合には，松田（1975）の M-L 式を用いてマグニチュードを計算する．④地震規模の推定の際の断層の長さには地下の断層の長さを用いることとする.⑤過去における 1 回のずれの量が求められている場合には，松田（1975）の M-D 式からマグニチュードを計算する．⑥活断層の長さについて信頼度が低い場合には，M-L 式と M-D 式を併用する．⑦歴史地震の研究や観測によって地震の規模が分かっている場合には，その値を引用もしくは参照して，上記の手法により求めた地震の規模と包括して記述する．⑧活動時の地震規模について，④, ⑤, ⑦により複数の値が得られた場合には，最も大きな値を評価に用いる．この際，地表に活断層が表れている場合は地震発生層の厚さに対応する規模以上の地震が発生すると想定されることを考慮する．⑨地下の断層の位置及び長さについて，複数の可能性が想定される場合，シナリオ毎に地震の規模を評価するとともに，ロジックツリーを用いてシナリオの重み付けを行う.」

今の断層モデルのレシピで用いられている入倉式では，上記の松田式による地震規模と比べて，多くの場合，国内の地震規模が半分以下へ過小算定され，地震動が過小評価されている．この矛盾を放置したまま，原発の地震動を過小評価し続けて良いのであろうか．島

崎邦彦氏の問題提起 [36] はこのことを問うているのである．

（注 **6**） 断層モデルにおける偶然変動の考慮について

断層モデルでは最終的に地震波が得られるため，地震波の中に「偶然変動によるバラツキ」も考慮されていると錯覚しがちである．しかし，震源パラメータの平均像から震源特性や伝播経路特性などの地域性を「不確実さの考慮」として検討したとしても，それは依然として偶然性のバラツキを考慮したことにはならない．断層モデルでは要素地震を観測点で重ね合わせて地震波を合成しており，この要素地震そのものに偶然変動のバラツキがあるからである．経験的グリーン関数法では，検討用地震の震源断層またはその周辺で発生した M5 程度の小規模地震について原発サイトで観測した地震波を要素地震として用いるが，検討用地震のアスペリティ応力降下量と当該地震の応力降下量との比で地震波の大きさを調整している．本来なら，こうして得た要素地震波のバラツキを検討し，保守的に要素地震波を設定する必要がある．しかし，要素地震の数が少ない場合には，川内原発の耐専スペクトル評価における 2 倍の偶然変動を考慮して要素地震波を 2 倍に引上げるのも一つの方法であろう．

高浜・大飯原発のように要素地震が全く取れていない場合にも，同様の考え方で，統計的グリーン関数法で生成した要素地震波を少なくとも 2 倍にするなどにより偶然変動のバラツキを考慮すべきである．

参考文献

[1] 防災科学技術研究所 (2008) :「平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震において記録されたきわめて大きな強震動について」,「加速度応答スペクトル＆速度応答スペクトル (h=5 %)」

[2] Boatwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models of faulting, Bull. Seism. Soc. Am., 78, 489-508

[3] （財）地域地盤環境研究所 (2011) : 震源を特定せず策定する地震動に関する計算業務報告書 (2011.3) http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/taishinkojo/pdf/ukeoi_1.pdf

[4] 中央防災会議 (2006) : 第 26 回「東南海，南海地震等に関する専門調査会」参考資料，中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布の検討資料集，図 2.3.2(2006.12.7）

[5] 中国電力 (2010) : 島根原子力発電所基準地震動 Ss の策定について，第 62 回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 WG3 第 62-7 号および速記録 (2010.3.3)

[6] 中国電力 (2010) : 島根原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書 (2008 年 3 月)，IV 基準地震動の策定 (2010.3.28)

[7] 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透 (2001) : 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，545，51-62

[8] Fujii Y. and Matsu'ura M. (2000) : Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, Pure appl. Geophys. 157, 2283-2302

[9] 独立行政法人原子力安全基盤機構 (2005) : 震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書 (平成 16 年度), JNES/SAE05-00405 解部報-0004(2005.6) https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000005757.pdf

[10] 原子力安全・保安院耐震安全審査室 (2012) : 活断層による地震動評価の不確かさの考慮について（考え方の整理案），第 7 回地震・津波に関する意見聴取会（地震動関係）(2012 年 8 月 17 日)

[11] 原子力規制委員会 (2013) : 震源を特定せず策定する地震動について，原子力規制委員会 発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる新安全設計基準に関する検討チーム第 10 回会合，震基 10-3(2013.3.22)

[12] 北海道電力 (2015) : 泊発電所 震源を特定せず策定する地震動について（コメント回答），第 210 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料 1 (2015.3.20)

[13] 池田隆明・釜江克宏・三輪 滋・入倉孝次郎 (2002) : 経験的グリーン関数法を用いた 2000 年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集 第 561 号, 37-45

[14] 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001) : シナリオ地震の強震動予測，地学雑誌，110，849-875

[15] 入倉孝次郎 (2004) : 強震動予測レシピ－大地震による強震動の予測手法－, 京都大学防災研究所年報, 47A

[16] 入倉孝次郎・香川敬生・宮腰研・倉橋奨 (2007) : 2007 年新潟県中越沖地震の強震動–なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか？–（2007 年 12 月 24 日修正版）

[17] 入倉孝次郎・倉橋奨 (2008):「2008 年岩手・宮城内陸地震の震源モデルと強震動－なぜ 4000 ガルの強震動が生成されたのか－」, 日本活断層学会 2008 年度秋季学術大会

[18] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2002):糸魚川－静岡構造線断層帯（北部，中部）の地震を想定した強震動評価

[19] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2005) :「全国を概観した地震動予測地図」報告書，分冊 2「震源断層を特定した地震動予測地図の説明（平成 17 年 3 月 23 日，平成 18 年 9 月 25 日改訂）」

[20] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2008) :「全国を概観した地震動予測地図」2008 年版，付録 3. 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」)（平成 20 年 4 月 11 日改訂）, 46-74

[21] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2009) : 震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）（平成 21 年 12 月 21 日改訂）

[22] 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会 (2010) :「活断層の長期評価手法」 報告書（暫定版）(2010.11.25)

[23] 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男 (2004) : 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル－地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討－，日本地震工学会論文集，第 4 巻，第 4 号，46-86

[24] 釜江克宏・池田隆明・三輪滋 (2003) : 2007 年 3 月 25 日能登半島地震 (MJ6.9) の震源のモデル化

[25] 関西電力株式会社 (2013) : 大飯発電所基準地震動の評価について，第 59 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料 2-3(2013.12.18)

[26] 関西電力株式会社 (2013) : 高浜発電所 基準地震動の評価について，第 63 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料 3-2(2013.12.25)

[27] 関西電力株式会社 (2014) : 高浜発電所 地震動評価について，第 131 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料 1-3(2014.8.22)

[28] 関西電力株式会社 (2015) : 大飯発電所 地震動評価について，第 206 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，資料 3-4(2015.3.13)

[29] 九州電力 (2013) : 川内原子力発電所第 1 ・ 2 号機の設置変更許可申請書，添付書類六 (2013.7.8)

[30] 松田時彦 (1975) : 活断層から発生する地震の規模と周期について，地震第 2 輯，第 28 巻，269-283.

[31] Matsu'ura M. and Sato T. : "Loading Mechanism and Scaling Relations of Large Interplate Earthquakes, " Tectonophysics, 227, pp.189-198 (1997)

[32] Noda, S., Yashiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M., Watanabe, T.(2002): Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, OECD Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering, Istanbul, 399-408(October, 2002)

[33] 佐藤良輔編著，阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典 (1989) : 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，105-381

[34] Scholz, C. H.(2002): The Mechanics of earthquakes and faulting, second edition, Cambridge University Press

[35] Shimazaki, K(1986): Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, Earthquake Source Mechanics, Am. Geopyhs. Union Geohys. Monogr., 37, 209-216.

[36] 島崎邦彦 (2015) :「活断層の長さから推定する地震モーメント」, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会，SSS28-07(2015.5.28) http://www2.jpgu.org/meeting/2015/session/PDF/S-SS28/SSS28-07.pdf

[37] Somerville, P. G., 入倉孝次郎，澤田純男，岩崎好規則，田居優，伏見実 (1993) : 地震断層のすべり変位量の空間分布の検討，第 22 回地震工学研究発表会，291-294.

[38] Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70, 59-80

[39] 武村雅之 (1998) : 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—-地震断層の影響および地震被害との関連—-，地震第 2 輯，51，211-228.

[40] 東京電力 (2008) : 柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動について，耐震・構造設計小委員会 第 9 回地震・津波，地質・地盤合同ワーキンググループ，資料合同W 9-1-2, 37(2008.5.22)

[41] 東京電力 (2009) : 耐専スペクトルの適用性検討 (内陸地殻内地震を対象とした追加検討内容)，原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会，資料第 1-2 号 (2009.5.22)

[42] 福井地方裁判所民事第 2 部（樋口英明裁判長）「平成 26 年 (ヨ) 第 31 号大飯原発３，４号機及び高浜原発３，４号機運転差止仮処分命令申立事件」決定，主文および要旨 (2015.4.14)

[43] 鹿児島地方裁判所民事第 3 部（前田郁勝裁判長）「平成 26 年 (ヨ) 第 36 号川内原発稼働等差止仮処分申立事件」決定，主文および要旨 (2015.4.22)

[44] 福井地方裁判所民事第 2 部（樋口英明裁判長）「平成 24 年 (ワ) 第 394 号，平成 25 年 (ワ) 第 63 号大飯原発３，４号機運転差止請求事件」判決，主文および要旨 (2014.5.21)

[45] 長沢啓行 (2006) : 新しい「耐震設計審査指針 (案)」は,「自然の摂理」に耐えられるか?，若狭ネット第 98 号，8-23(2006.5.24) http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-3.pdf, http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-4.pdf, http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-5.pdf,

[46] 長沢啓行 (2014) : 大飯 3・4 号と高浜 3・4 号の耐震安全性は保証されていない，若狭ネット第 147 号，6-27(2014/1/14) http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/147.pdf

[47] 長沢啓行 (2015) : 川内１・２号の耐震安全性は保証されていない，若狭ネット第 149 号，6-31(2014/5/11) http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/149.pdf
（菊地・山中 (1997) 論文の地震モーメントについて 5/23）
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/explain20140522.pdf

[48] 長沢啓行 (2015):1000 ガル超の「震源を特定せず策定する地震動」がなぜ採用されないのか，若狭ネット第 150 号，9-35(2014/7/12) http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/150.pdf

[49] 若狭ネット編集局 (2014) :「川内 1·2 号の審査書案を受けた地震動評価等に関するに関する 2014 年 7 月 29 日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140801.pdf
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/record20140729.pdf
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/summary20140729.pdf

[50] 若狭ネット編集局 (2015) :「川内・高浜・大飯原発の基準地震動と川内原発の火山に関する 2015 年 1 月 16 日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150123.pdf
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150116rec.pdf
http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150116summary.pdf

著者略歴

1975 年大阪大学工学部機械工学科 (蒸気工学) 卒業
1977 年大阪大学大学院工学研究科 博士前期課程
　産業機械工学専攻 (生産システム工学) 修了
1977 年大阪府立大学工学部経営工学科助手
1986 年同講師
1988 年同助教授
1995 年同教授 (生産管理システム)
2001 年大阪府立大学評議員 (3.5 年)
2001 年大阪府立大学学長補佐 (1 年)
2009 年大阪府立工業高等専門学校長
2011 年公立大学法人大阪府立大学理事 (高専担当)
　兼大阪府立大学工業高等専門学校長
社団法人日本経営工学会理事 (2000～05)・
　　監事 (2005～09)
社団法人日本経営工学会学会賞 (2008)・
　　学会貢献賞 (2010)
大阪府立大学名誉教授 (2009)
大阪府立大学工業高等専門学校名誉教授 (2013)
京都大学工学博士 (1985)