

2014年5月6日

川内1・2号の耐震安全性は保証されていない

大阪府立大学名誉教授 長沢 啓行

要旨

九州電力の川内1・2号が新規規制基準適合性審査の審査書案作成段階に入り、「再稼働1号」になる可能性がささやかれている。しかし、次のような根本問題が依然として横たわっている。

第1に、九州電力はその基準地震動を270ガルから370ガル、540ガルと小出しに引き上げてきたが、それは全原発に共通した「M6.5の直下地震」や「震源を特定せず策定する地震動」の導入によって余儀なくされたにすぎず、周辺活断層を積極的に評価して基準地震動の作成に活かそうと努力した結果ではない。今回も地震調査研究推進本部による「九州地域の活断層の長期評価（第1版）」をしぶしぶ受け入れたにすぎず、周辺活断層の耐専スペクトルが540ガルの基準地震動Ss-1Hのすぐ近くまで上がったが、基準地震動Ss-1Hを変更するそぶりを見せていない。620ガルの2004年北海道留萌支庁南部地震の解放基盤波が基準地震動Ss-2として追加されたが、重要な施設への影響がほとんどない地震波形だったため、あくまで補完的なものにすぎず、基準地震動は基本的に変わっていない。

第2に、市来断層帯市来区間の耐専スペクトルは基準地震動Ss-1Hに極めて近く、ほとんど余裕はない。地下で1000ガル超を観測した2008年岩手・宮城内陸地震など最近20年間の国内地震観測記録は耐専スペクトルに反映されておらず、「倍半分」のバラツキ(偶然変動)を考慮する必要もある。市来断層帯甕海峡中央区間や甕断層帯甕区間は原発から遠方へ伸びる断層であり、耐専スペクトルでは過小評価されている。したがって、少なくとも今の耐専スペクトルから2倍の余裕をもつように基準地震動を設定し直す必要がある。

第3に、九州電力による断層モデルを使った地震動評価結果は、とくに市来断層帯市来区間では、耐専スペクトルの1/2~1/3にすぎない。これは、アスペリティの平均応力降下量を15.9MPaと小さく設定したためである。その根拠になったものは、

東西と南北の2断層がほぼ同時に活動した1997年5月13日鹿児島県北西部地震の震源パラメータだが、九州電力の引用した菊地・山中論文(1997)は「東西断層を中心とした活動に関する地震モーメント」を記載したものであるにもかかわらず、九州電力はこれを「2断層による活動全体の地震モーメント」だと曲解し、アスペリティ平均応力降下量を小さく算出した。the Global CMT projectによる地震モーメントを使えば25.1MPaになるべきところ、九州電力は15.9MPaに小さく設定したのである。しかも、断層平均応力降下量から逆算して地震規模を大きく見せ、アスペリティ応力降下量はその規模に見合ったものであるかのように装った。さらに、応力降下量の不確かさとして1.5倍化を考慮すべきところ、短周期レベルだけを比較して1.25倍に留めた。本来なら、地震調査研究推進本部による活断層の長期評価と同様に、断層の長さから松田式で地震規模を算出し、それに合うよう震源パラメータを大きく設定すべきである。1997年5月13日鹿児島県北西部地震の震源パラメータに基づいて応力降下量を固定するのであれば、アスペリティ平均応力降下量を25.1MPa、断層平均応力降下量を5.5MPa、アスペリティ面積比を22.0%として地震動評価を根本的にやり直すべきである。

耐専スペクトルや断層モデルによるこれらの過小評価を是正し、地震動評価を抜本的に改めれば、基準地震動を現在の2倍以上、1000ガル以上へ大幅に引き上げざるを得なくなるであろう。そうなれば、川内1・2号のクリフエッジ(炉心溶融に至る限界の地震規模)を超えるため、再稼働どころではなくなる。九州電力による地震動過小評価のトリックを真剣に検討するならば、審査を振り出しに戻すことは避けられない。もし、原子力規制委員会・原子力規制庁がこのまま審査書案を完成させ、「新規規制基準に適合している」との判断を下すとすれば、それは「重大な瑕疵を意図的に行う」ことになると言わざるを得ない。

1 はじめに

鹿児島県川内原子力発電所 1・2 号炉の地震動評価は、これまで余り注目されてこなかったように思われる。それは、「近くに原発の耐震性を脅かすような大きな活断層がない」と考えられてきたからであろう。現に、旧耐震設計審査指針による基準地震動(限界地震 S2)は「M6.5 の直下地震」で決められていたし、2006 年の指針改定時にも「震源を特定せず策定する地震動」によって基準地震動 Ss が決められていた。しかし、実際には周辺に M7.2 や M7.5 もの地震をもたらす大きな活断層が何本も横たわっていたのだ。九州電力が長年「見つけられなかった」活断層が「突然現れた」のである。

九州電力は、地震調査研究推進本部が 2013 年 2 月に公表した「九州地域の活断層の長期評価(第 1 版)」をしぼしぼ受け入れた。それまで、九州電力をはじめ電力会社は例外なく、「原発では詳細な調査をやっているから活断層を見逃すことはない」と言い張り、地震調査研究推進本部とは異なる「原子力ムラに特有の基準や方法」で活断層を評価し、地震動評価を行ってきた。3・11 東日本大震災と福島第一原発重大事故で、そのような傲慢な対応は許されなくなった。追い込まれた電力会社は、活断層が「現れたり、伸びたり」することは認めたが、地震動評価では原子力ムラに特有の古い考え方と古いやり方をあくまで踏襲し、維持しようとしている。ここが「最後の砦」になるからだ。

2006 年指針改定以降、地震動評価には主に「耐専スペクトル」と「断層モデル」による方法が用いられるようになった。

高浜 3・4 号では、断層モデルによる地震動評価結果が耐専スペクトルの 1/2~1/3 にすぎなかった。川内 1・2 号でも同様であった。高浜 3・4 号では、北米中心の地震データに合わせた断層モデルを国内の活断層にそのまま適用したことで地震規模が 1/2 以下に過小評価されることが原因であった。しかし、川内 1・2 号の市来断層帯市来区間の地震規模は断層長さから松田式で求めた地震規模とほとんど変わらなかった。にもかかわらず、なぜ、過小評価になっているのか？その疑問に答えるのがこの小論の一つの役目である。

九州電力による断層モデルを駆使した地震動過小評価は実に巧みなテクニックを使っており、原子力安全・保安院、原子力安全委員会、そして現時点では原子力規制委員会・原子力規制庁もそれを見抜けていない。その鍵は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震 M6.4 の震源パラメータにあった。九州電力は菊地・山中論文(1997)を曲解してアスペリティ平均応力降下量を小さく設定し、それをそのまま M7.2 や M7.5 の大地震に固定して採用した。その結果、地震動が大幅に過小評価される結果になったのである。地震規模は見かけ上、大きく算出されているが、単なる「飾り」にすぎず、地震動評価にはほとんど関係していない。

耐専スペクトルによる地震動評価も過小評価になっている。最近 20 年間の地震観測記録が反映されていないし、「倍半分」のバラツキ(偶然変動)も考慮されていない。

耐専スペクトルや断層モデルによるこれらの過小評価を是正すれば、川内 1・2 号の基準地震動を 2 倍以上、1000 ガル以上に引き上げざるを得なくなる。それを論証するのがこの小論のもう一つの役目である。

原子力規制委員会・原子力規制庁が「規制の虜」状態から脱することができるかどうか、それが川内 1・2 号の地震動評価で問われることになるだろう。この小論がその火付け役の一つになることを期待してやまない。

2 川内 1・2 号の基準地震動

九州電力は川内原子力発電所 1・2 号炉の基準地震動を何度も変更してきた。川内 1 号の基準地震動(旧指針の限界地震 S2)は、原子炉設置許可が下りた 1977 年 12 月の時点で 270 ガルだったが、1995 年兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)の後で川内 2 号(1980 年 12 月の原子炉設置許可)と同じ 370 ガル(模擬地震波では 372 ガル)に引き上げられた。このとき、基準地震動は「2つの限界地震 S2(SN), S2(Sk2)」の応答スペクトルで定められていた。

S2(SN)は全原発に共通して適用される「M6.5、震源距離 $X = 10\text{km}$ の直下地震」を表す大崎スベ

クトルだが、「直下」とは名ばかりで、震央距離が7.1kmも離れた地点での震源深さ7.2kmの地震であり、結果として震源距離が10kmになるという代物である。これを「直下」地震と呼んだのには理由がある。旧指針では、地震規模によって定められる ΔNEAR^1 圏内では地震動の最大加速度は頭打ちになり、震源にいくら近くても変わらないという仮定があったためである。このような仮定がいかに現実を無視したものであったかは、「M6.1の2004年北海道留萌支庁南部地震」による620ガルの地震動（解放基盤表面はぎとり波換算）が、地震規模で4倍の「M6.5の直下地震」の地震動（370ガル）を大幅に超えたという事実を見れば明らかである。当時の科学技術庁や原子力安全委員会など原子力規制当局は、地震観測記録がないのをいいことに、このような地震動の頭打ち＝過小評価を頑強に主張し続けたのである。それは、今日の地震動評価を検討する際にはぜひとも肝に銘じておくべき厳然たる事実である。

S2(Sk2)は周辺の活断層調査等に基づいて定められた限界地震だが、図3のように周期0.17秒以下ではS2(SN)より小さい。川内原発にとって重要な0.02~0.5秒の周期（重要な施設の固有周期で、図4参照）の大半でS2(SN)より小さいということは「原発周辺に活断層がほとんどない」ということを意味している。実際、図1の緑線で示されるように、川内1・2号の設置許可時には「原発周辺に活断層などほとんどなかった」のである。

2006年に耐震設計審査指針が大幅に改訂されバックチェックが行われると、2008年3月31日付け中間報告で川内1・2号の基準地震動は540ガルへ引き上げられた（図3参照）。このときも、図1の赤線で示されるように、原発周辺に「活断層が消えたり、突然現われたり、伸びたりした」ものの、いずれも短くて原発の耐震性に影響を与えるほどではなかった。このバックチェック時に基準地震動を引き上げた要因は、「M6.5の直下地震S2(SN)」に替わって新しく採用された「震源を特定せず策定する地震動」（図3の破線）である。

この「震源を特定せず策定する地震動」は、長沢(2006)[24]が詳細に批判したとおり、震源断層最

¹気象庁マグニチュードをMとして、 $\Delta\text{NEAR} = 10 \times 2^{M-7}$, $6 \leq M \leq 7$; $10 \times 2.5^{M-7}$, $7 \leq M \leq 8$, で求められる。

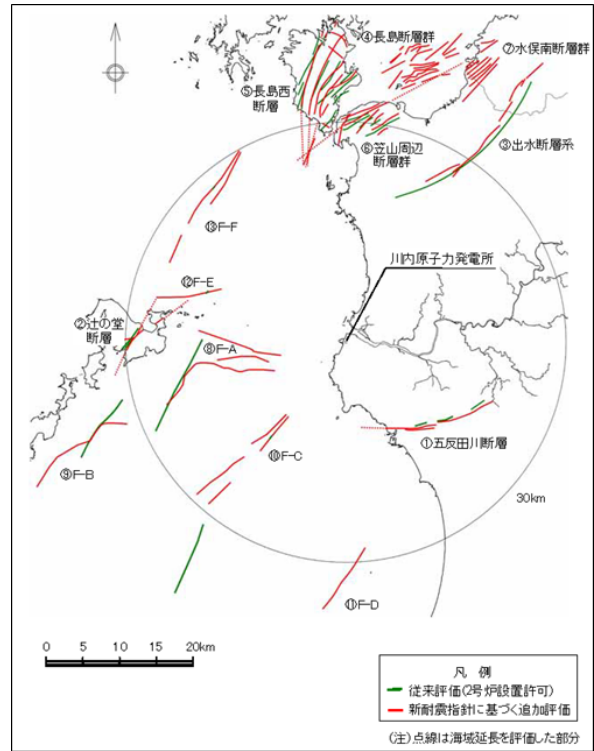


図1: 1980年川内2号設置許可時と2008年バックチェック時における九州電力の活断層評価 [13]

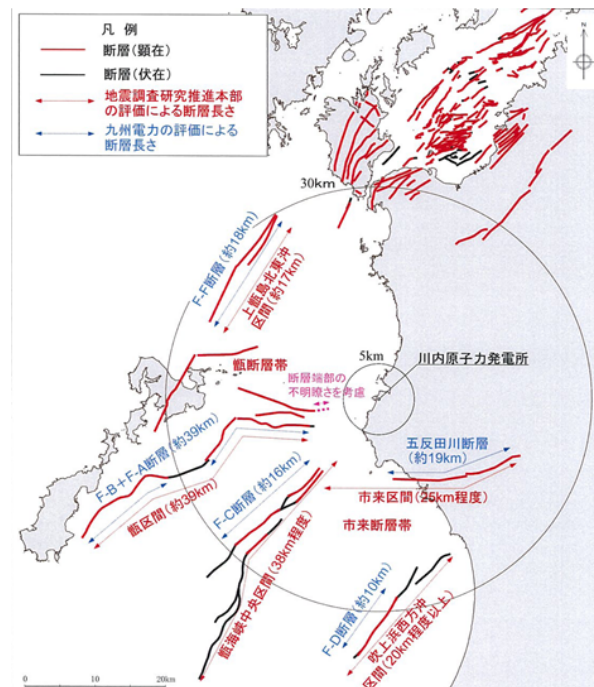


図2: 2014年原子力規制委員会適合性審査における九州電力の活断層評価 [17]

短距離20km以内の第三紀以前の硬質地盤で観測された16地震（M6.2~7.3の国内5地震とMw5.8~7.0のカリフォルニア11地震）の観測記録をわざわざ収集しながら、「地表地震断層が現れた地震」や「周辺の活断層や活褶曲構造などから起こりうると推定できる地震」を次々と除外し、小規模な9

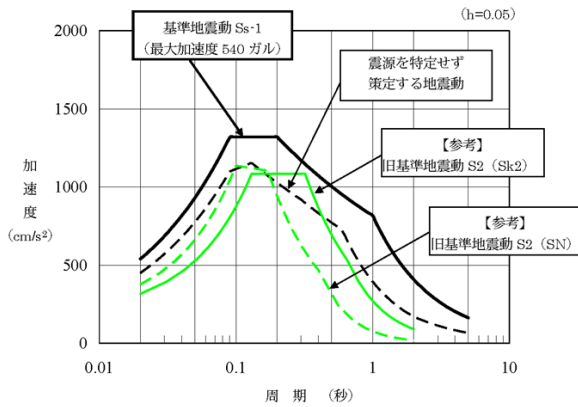


図 3: 1980 年川内 2 号設置許可時と 2008 年バックチェック時における基準地震動 [13]

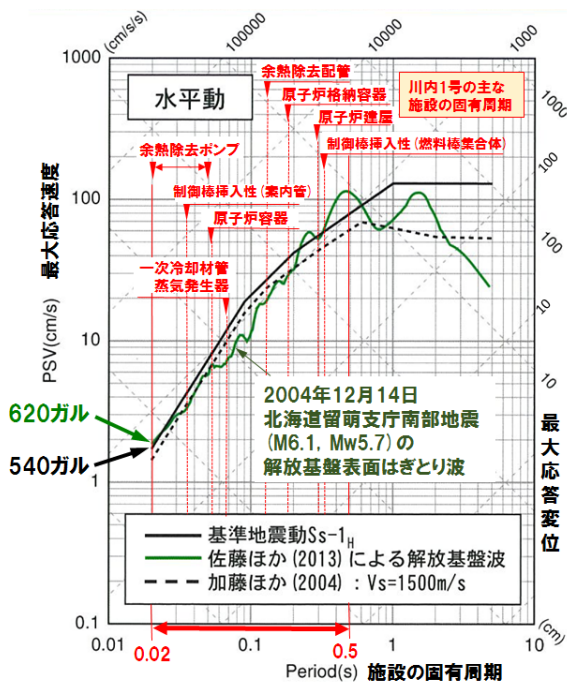


図 4: 2014 年原子力規制委員会適合性審査における川内 1・2 号の基準地震動 [16] と主な施設の固有周期 [12]

地震の観測記録を使って無理矢理作られたものである。実際には、こうして「除外」された末に残ったのは、後に九州電力にとって極めて重要な地震となる「1997 年 3 月 26 日と 5 月 13 日の鹿児島県北西部地震 (M6.6 と M6.4 の 2 地震)」だけだった。しかし、これでは余りにも説得力がないため、除外した地震のうち「事前に震源の位置と規模を評価できた可能性がある」M6.5 未満 (Mw6.2 未満) のカリフォルニア 7 地震については、「M6.8 を境に断層パラメータのスケールが変わることから確実に事前に震源を特定できるとは断定できない」との理由をひねり出し、これらで「記録の少

なさを補う方針とし」、これら 9 地震の疑似速度応答スペクトルを包絡するように作られたのが「震源を特定せず策定する地震動」なのである。島崎邦彦 (2008) は「予め震源が特定できない地震の最大規模は M7.1 程度と考えられる」[30] と主張しており、そうであるならば、「地域性を考慮して除外する」ようなことはせず、硬質地盤での M7.1 までの地震観測記録を収集してそれらすべてを包絡するように作り直すべきであろう [25]。

それはさておき、川内 1・2 号の基準地震動が周辺活断層ではなく、2008 年バックチェック時にも「震源を特定せず策定する地震動」によって決まっているということは、やはり周辺活断層による地震動評価が過小評価であったというべきであろう。

そして、今回の原子力規制委員会による新規制基準適合性に係る審査で、川内 1・2 号の基準地震動は 540 ガルから 620 ガルへ「引き上げ」られた。とはいえ、実際のところ、図 4 のように、2004 年北海道留萌支庁南部地震 (M6.1) の解放基盤表面はぎとり波が「追加された」だけであり、重要な機器の固有周期にはほとんど関係がなく、大きな影響が出ないことは明らかだ。本来なら、この地震波を包絡するように基準地震動 Ss-1H (黒線) そのものを「引き上げ」てこそ、基準地震動の「引き上げ」と言えるのではないだろうか。しかし、ほとんどの国民は、実際にはそうなっていないことを知らされていない。

このように基準地震動の策定経緯を見てくると、川内原発周辺の活断層による地震は基準地震動の策定に全く影響しないかのように見える。本当にそうなのか？

九州電力による活断層評価は、原子力規制委員会への 2013 年 7 月 8 日申請時には 2008 年バックチェック時とほとんど変わらなかったが、地震調査研究推進本部が 2013 年 2 月に公表した「九州地域の活断層の長期評価 (第一版)」[31] を取り入れざるを得ないとみた九州電力は、手のひらを返したように評価を変えた。「これまで詳細に調査してきたはずではなかったか」とつい言いたくなるのだが、図 2 のように活断層は非常に長く「伸び」、市来断層帯市来区間は 24.9km (M7.2)、市来断層帯

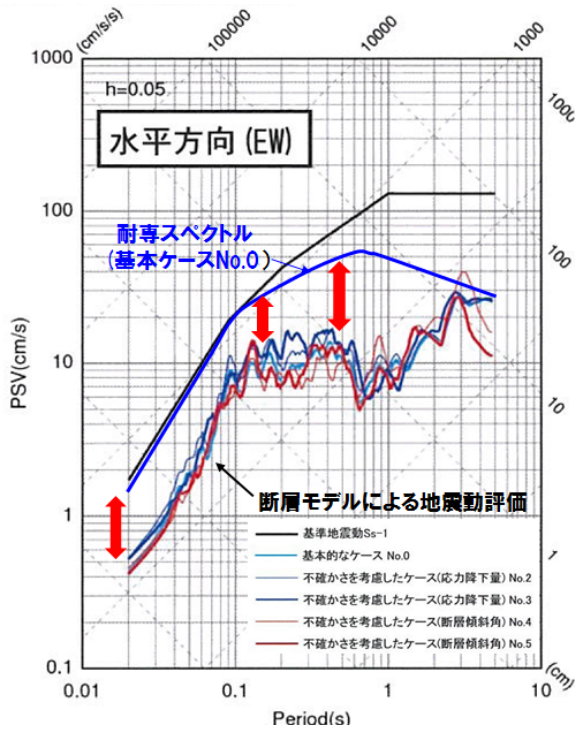


図 5: 適合性審査における川内 1・2 号の基準地震動 Ss-1 と市来断層帯市来区間 (24.9km, M7.2) の地震動評価結果 (水平 EW 方向)[17]

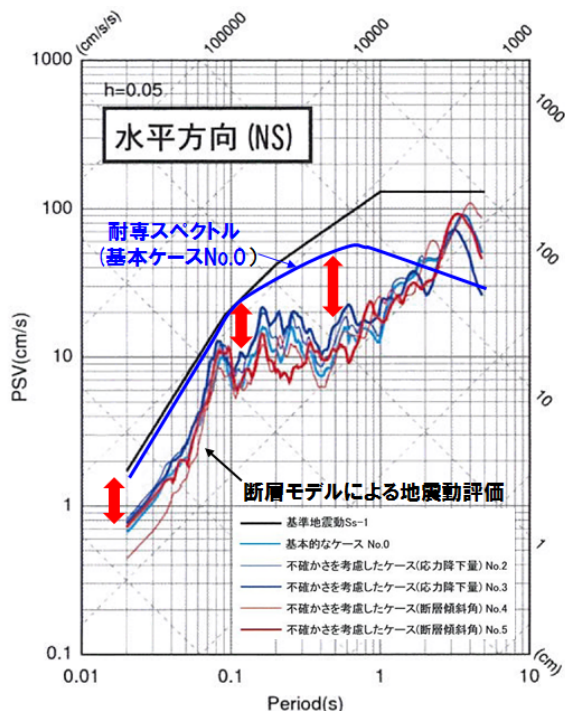


図 6: 適合性審査における川内 1・2 号の基準地震動 Ss-1 と市来断層帯市来区間 (24.9km, M7.2) の地震動評価結果 (水平 NS 方向)[17]

甕海峡中央区間は 38.5km(M7.5), 甕断層帯甕区間は 40.9km(M7.5) となった。これほど大きな断層帯に囲まれていながら、基準地震動には全く影響し

ないということがあり得るのだろうか？

一例として、市来断層帯市来区間に対する九州電力の地震動評価結果を図 5 および図 6 に示す。いずれの図においても、最上位にある黒線が基準地震動 Ss-1 だが、青線の耐専スペクトルがこれに極めて近く、周期 0.1 秒付近で接しているようにも見える。もし、この耐専スペクトルが実際の地震動を過小評価していたら、どうなるのか？また、複数の波線は断層モデルによる評価結果だが、耐専スペクトルの 1/2~1/3 程度にしかならない。同じ活断層に対する地震動評価なのに、これほど食い違っていいのだろうか？

実は、「耐専スペクトル」は 20 年ほど前に作られたものであり、1995 年兵庫県南部地震以降に収集された M7 クラスの地震観測記録が反映されていないし、耐専スペクトルは地震観測記録の平均的なスペクトルを示すものであり、実際の応答スペクトルには「倍半分」のバラツキもある。「断層モデル」は北米中心の地震データに基づいて作られたものであり、国内の活断層にそのまま適用すると地震規模が 1/2 以下に過小評価され、地震動が大幅に過小評価される [34, 27, 26]。加えて、九州電力は地震動評価にとって極めて重要な「アスペリティの平均応力降下量」を過小設定し、最初から地震動評価結果が小さくなるようにパラメータを決めていた。つまり、耐専スペクトルや断層モデルによる評価手法を古いまま適用したり、アスペリティ応力降下量をあらかじめ低く設定するなど姑息なことをやめ、最近 20 年間に蓄積された国内地震データに基づいてこれらの手法を抜本的に作り替え、「倍半分」のバラツキを考慮するなど適切に評価すれば、基準地震動を 540~620 ガルの 2 倍以上、1000 ガル以上へ大幅に引き上げざるをえなくなるのである。しかし、そうなれば、炉心溶融事故を防ぐギリギリの地震動 (クリフエッジ) を超えてしまうため、再稼働できなくなるかも知れない。なぜなら、原子力安全・保安院は 2012 年のストレステスト (一次評価) でクリフエッジを川内 1 号で 1.86Ss(1,004gal), 2 号で 1.89Ss(1,020gal) と評価していたからである [20]。

3 耐専スペクトルと地震観測記録

耐専スペクトルは、社団法人日本電気協会の原子力発電耐震設計専門部会（「耐専」部会）が作った応答スペクトルであり、部会名称から「耐専」スペクトルと呼ばれている。M5.5～M7.0 の中規模44地震の観測記録に基づいて作成され、1998年の日本地震工学シンポジウムで初めて発表された。1995年兵庫県南部地震を契機に拡充された地震観測網 K-NET のデータでその適用性が検討され、2002年の OECD ワークショップで詳細に報告された [29]。その後も、原子力安全委員会の作業部会で震源断層直上のデータを含めてその適用性が検討されたが [33]、あきれたことに、原子力規制委員会・原子力規制庁にはその内容が引き継がれず、適用範囲が狭いままに運用されていた [28, 35]。

断層モデルは震源断層を長方形で近似的に表し、コンピュータで地震動をシミュレーション計算するものだが、パラメータの設定次第で結果が変わる。一方、耐専スペクトルは国内の地震観測記録に基づいた経験式であるため、そのような恣意性が入る余地は少なく信頼性は高いが、データ不足と原発から遠ざかる断層に対しては過小評価になるという欠陥がある [34, 27, 26]。

耐専スペクトルが作られた当時の元データは44地震だが、その3/4はプレート境界地震であり、内陸地殻内地震より強い地震動を生み出す。そのため、内陸地殻内地震に適用する際には図8の破線のように0.6倍するか、図8の実線のようにサイトでの地震観測記録があればそれで補正することになっている [29]。

川内原発では図7のように5つの内陸地殻内地震（活断層による地震）が観測されており、図8の補正係数（実線）が使える。九州電力は2008年のバックチェック時にはこの補正係数で耐専スペクトルを補正していたが [13]、新潟県中越沖地震の教訓を受け、他の多くの電力会社（四国電力は除く）と同様に、今回の新規規制基準適合性審査では補正係数を使っていない [15]。

「新潟県中越沖地震の教訓」とは、2007年7月に起きたM6.8の地震で、図9のように、柏崎・刈羽原発で1699ガルという非常に大きな地震動（解放基盤表面はぎとり波）が観測され、耐専スペクト

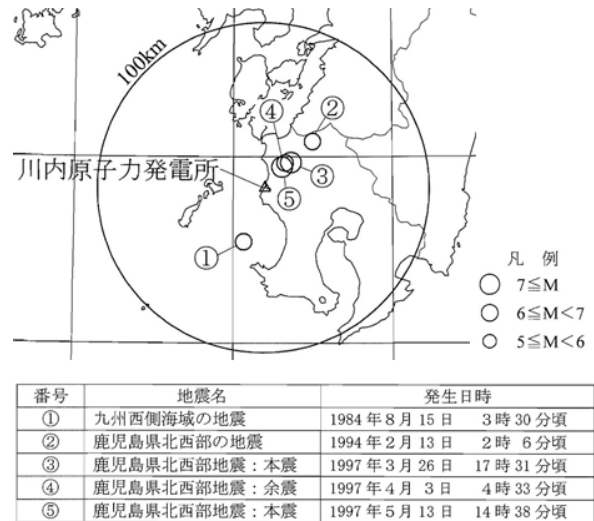


図7: 川内原発で観測された活断層による地震 [15]

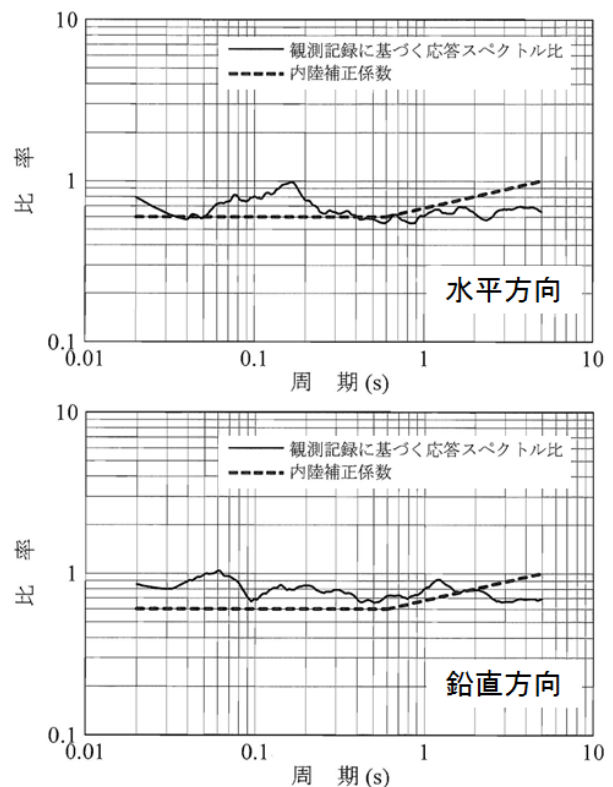


図8: 川内原発での内陸地殻内地震観測記録に基づく耐専スペクトルの補正係数 [15]（破線は Noda et al.(2002)[29] の示した国内の内陸地殻内地震に対する平均的な補正係数、実線が川内原発での観測記録に基づく補正係数）

ル（内陸補正あり）が実際の地震動を1/6に過小評価していたことを指す。詳細は別稿 [27, 26] に譲るが、地震動は「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「地盤増幅特性」で約2倍、合計約6倍に増幅されたという [32]。これ以降、震源特性の不確かさ1.5倍を考慮し、深部地下構

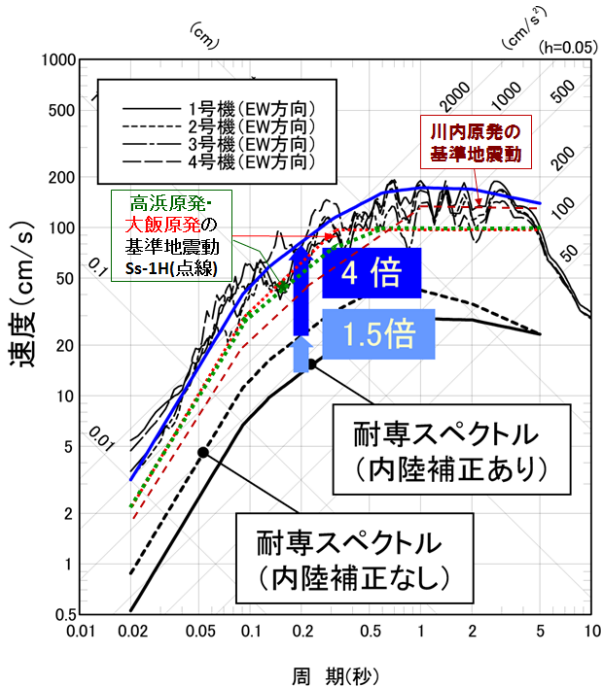


図 9: 柏崎刈羽原発 1~4 号での新潟県中越地震時の解放基盤表面地震動はぎとり波の応答スペクトル (東西 EW 方向) [32] (東電が推定した解放基盤表面地震動 (はぎとり波) の最大加速度 (上図で周期 0.02 秒における応答加速度に対応する) は, 1699gal(1 号), 1011(2 号), 1113(3 号), 1478(4 号), 766(5 号), 539(6 号), 613(7 号) である。耐専スペクトルの「内陸補正あり」は海洋プレート間地震のデータ等の混在したデータによる耐専スペクトルを内陸地殻内地震のスペクトルに補正するもので、「内陸補正なし」を約 0.6 倍したものである。川内 1-2 号, 大飯 3-4 号, 高浜 3-4 号の基準地震動 Ss-1H をはるかに超えている。)

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 (常識のない電力会社もいるが)。耐専スペクトルで内陸補正を行わないと, 自動的に震源特性 1.5 倍を考慮したことに等しくなる。断層モデルでも, 不確か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 (当初は 25MPa だった [18]) 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 [19]。

さらに, 2008 年 6 月に岩手・宮城内陸地震 M7.2 が起きたとき, その震源近傍の一関西 (いちのせきにし) で最大加速度が地表で 4022 ガル (gal, cm/s^2), 地下で 1078 ガル (いずれも 3 成分合成) という極めて大きな地震動が観測された [6]。とくに, この地下地震計は深さ 260m, S 波速度 1810m/s の岩盤に設置されており, 川内原発の解放基盤表面位置 (標高 -18.5m) のせん断波 (S 波) 速度 1500m/s と同等である。この地下地震計で 1078 ガルの強震動が観測

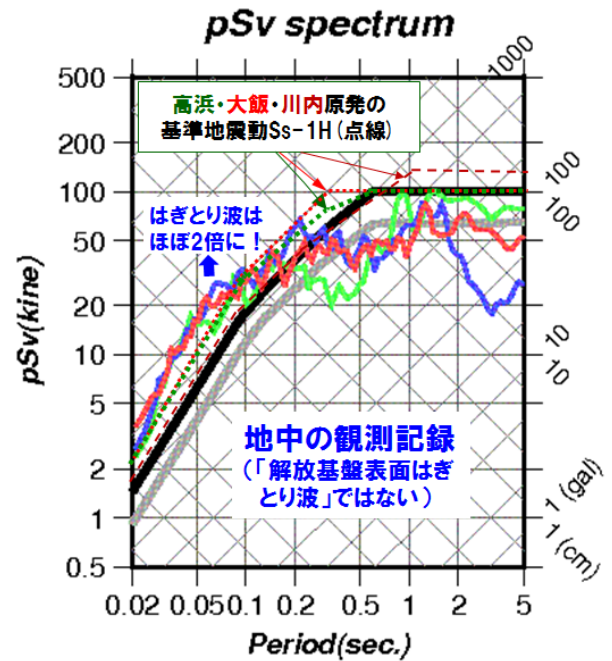


図 10: 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地震観測記録 (地下) の応答スペクトル [21] と川内 1-2 号 (540 ガル), 高浜 3-4 号 (700 ガル), 大飯 3-4 号 (700 ガル) の基準地震動 Ss-1H との比較

表 1: 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])

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

された事実は極めて重く, これを解放基盤表面はぎとり波に換算すればほぼ 2 倍の 2000 ガルにも達しよう。ところが, これらを含めて最近 20 年間の地震観測記録は耐専スペクトルに反映されていない。耐専スペクトルの最大加速度と等価震源距離との関係は地震規模ごとに図 11 の曲線で表されるが, 震源断層直上のデータも含めて最近 20 年間の地震観測記録を反映させれば, 耐専スペクトルは図 11 の曲線より急カーブになり, 適用範囲も震源域内まで一挙に拡大される。

さらに, 実際の地震動は耐専スペクトル (内陸補正あり) と比べて, 図 12 のように「倍半分」(「観測/耐専」の値で 0.5~2 の範囲, または, 赤線の残差平均と比べて 0.5~2 倍のやや太い青実線の範囲) 以上のバラツキがある。これは, 震源断層の長さや傾斜角, 破壊開始点やアスペリティの位置, 破碎伝播速度, 応力降下量 (震源特性で 1.5 倍) な

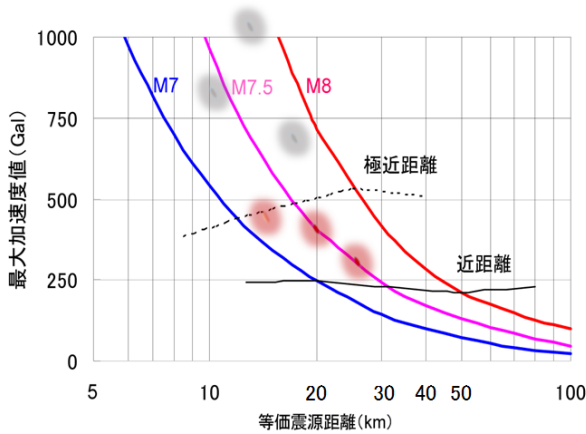


図 11: 耐専スペクトルの等価震源距離と最大加速度の関係 [7] (市来断層帯市来区間 (M7.2, $X_{eq} = 14.29\text{km}$), 市来断層帯甕海峡中央区間 (M7.5, $X_{eq} = 20.16\text{km}$), 甕断層帯甕区間 (M7.5, $X_{eq} = 23.65\text{km}$), 高浜 3-4 号の FO-A ~ FO-B 断層と熊川断層の連動 (M7.8, $X_{eq} = 18.0\text{km}$) は耐専スペクトルが適用されたが, 大飯 3-4 号の FO-A ~ FO-B 断層 (M7.4, $X_{eq} = 10.5\text{km}$) と FO-A ~ FO-B 断層と熊川断層の連動 (M7.8, $X_{eq} = 12.6\text{km}$ 程度) は適用範囲外とされた)

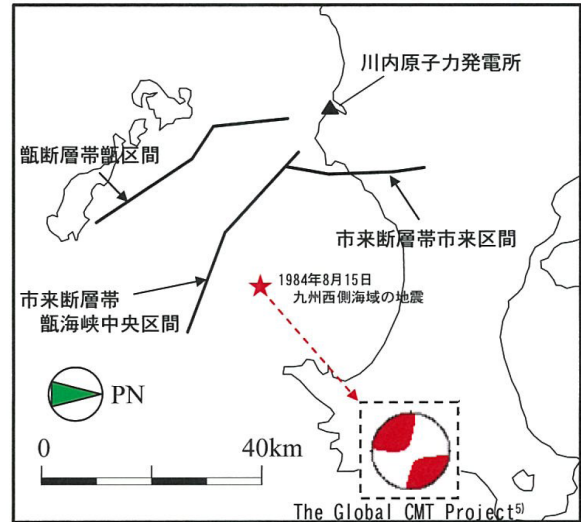


図 13: 川内 1・2 号で地震動評価された 3 つの活断層と断層モデルで用いられた要素地震 [17]

ど震源断層のパラメータ自体の不確かさとは区別される「偶然変動の不確かさ」である。したがって、耐専スペクトルや断層モデルによる地震動評価からさらに「倍半分」の偶然変動が存在することを前提にして基準地震動 S_s を設定し、耐震設計を行う必要がある。

川内 1・2 号に即して言えば、図 5 および図 6 のように市来断層帯市来区間の耐専スペクトルは基準地震動 S_s -1H に極めて近いことから、最近の地震観測記録を取り入れたり、「倍半分」のバラツキを考慮すれば、 S_s -1H をほぼ 2 倍の 1000 ガル以上へ大幅に引き上げるべきであろう。

市来断層帯甕海峡中央区間区間と甕断層帯甕区間については、断層が原発から遠ざかる方向へ伸びていることから、耐専スペクトルによる地震動評価が過小評価になっている可能性があり、注意を要する。図 13 で川内原発との断層最短距離を見れば、市来断層帯甕海峡中央区間区間と甕断層帯甕区間の方が市来断層帯市来区間より近く、断層長さや地震規模も数倍大きい。ところが、これらの耐専スペクトルは図 14 ~ 図 17 のように、重要な周期 0.02 ~ 0.3 秒の範囲で図 5 および図 6 よりやや小さい。逆に、これらの断層モデルによる地震動評価結果は数割大きくなっており、結果として、市来断層市来区間と比べて耐専スペクトルと断層モデルの差が小さくなっている。このような例は、浜岡原発における地震動評価で典型的に現われ、耐専スペクトルの欠陥として広く認識され

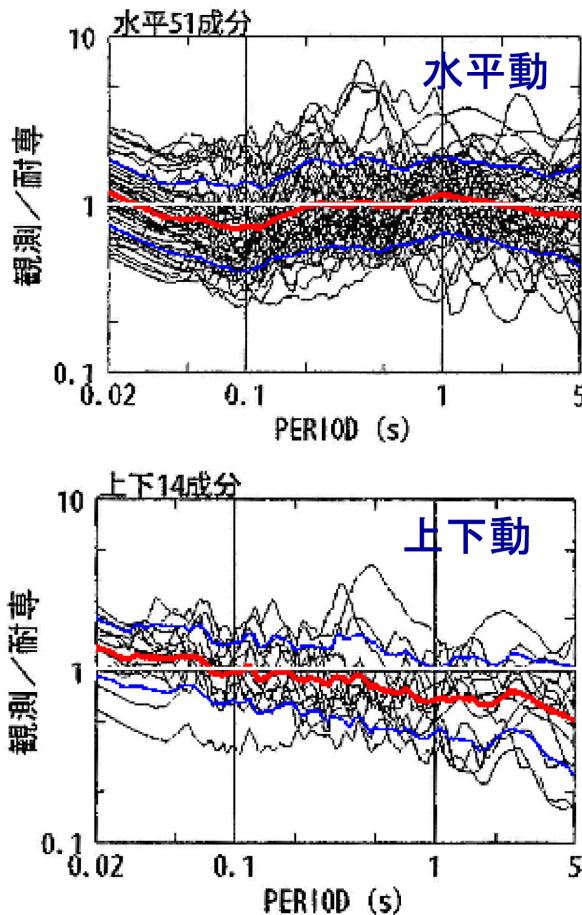


図 12: 国内外の内陸地殻内地震による震源近傍の観測記録 (M6.0~8.1, $X_{eq} = 6 \sim 33\text{km}$, 水平 51 記録, 上下 14 記録) の耐専スペクトル (内陸補正有) との残差 (バラツキ) [33] (細線: 各地震観測記録に対する残渣, 太い赤実線: 残渣の平均, やや太い青実線: 平均からの「倍半分」の差)

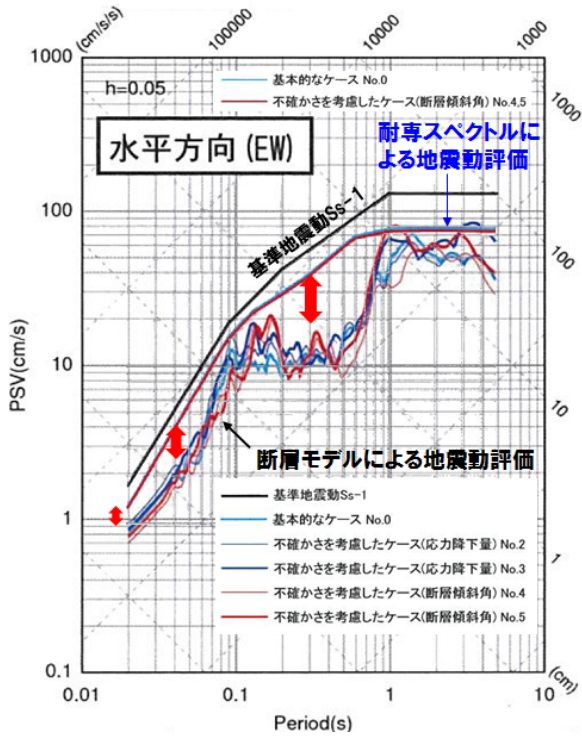


図 14: 市来断層帯甕海峡中央区間 (38.5km, M7.5) の地震動評価結果水平 EW 方向[17]

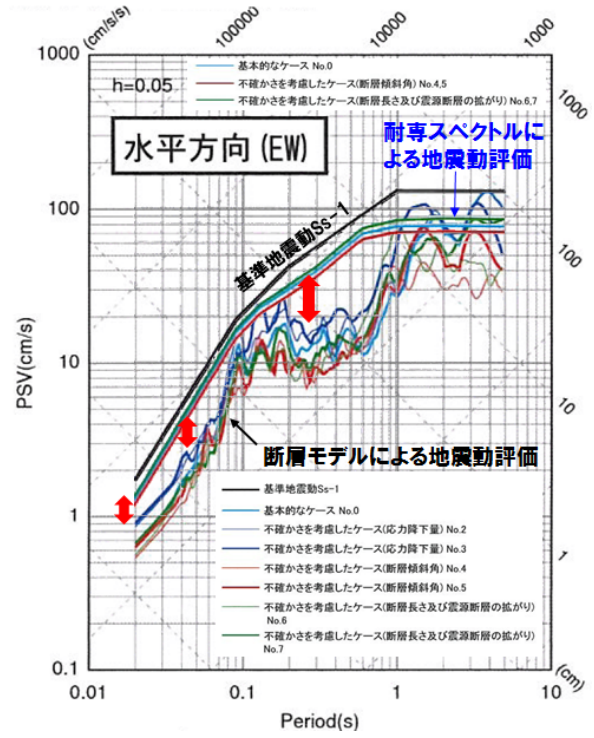


図 16: 甕断層帯甕区間 (40.9km, M7.5) の地震動評価結果水平 EW 方向[17]

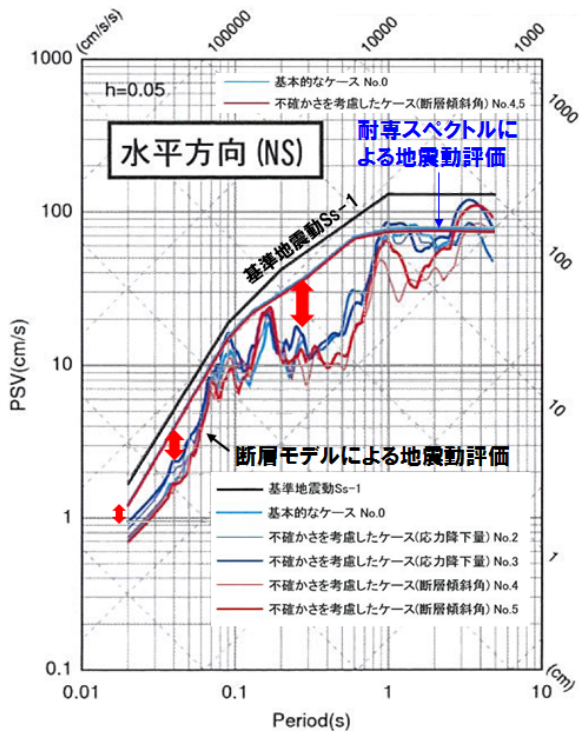


図 15: 市来断層帯甕海峡中央区間 (38.5km, M7.5) の地震動評価結果水平 NS 方向[17]

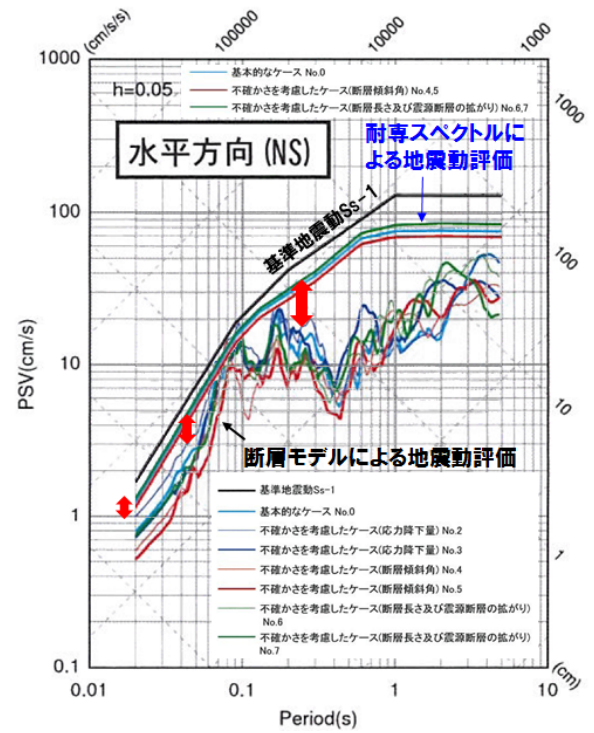


図 17: 甕断層帯甕区間 (40.9km, M7.5) の地震動評価結果水平 NS 方向[17]

ている。図 18 と図 19 がその評価結果だが、④仮想的東海・東南海地震は③仮想的東海地震を含むにもかかわらず、耐専スペクトルでは小さく評価

されるという矛盾した結果になっている。なぜこうなるのかと言うと、地震規模が M8.0 から M8.4 へと 4 倍に増えるが、等価震源距離が 36.3km か

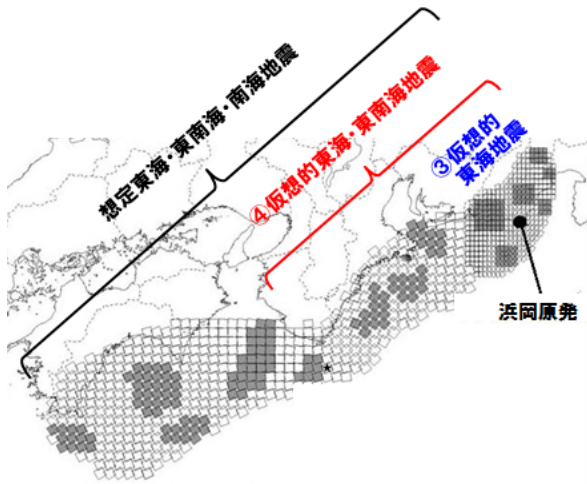


図 18: 中央防災会議をベースにした中部電力バックチェック報告における想定東海地震等の各断層モデル [3]

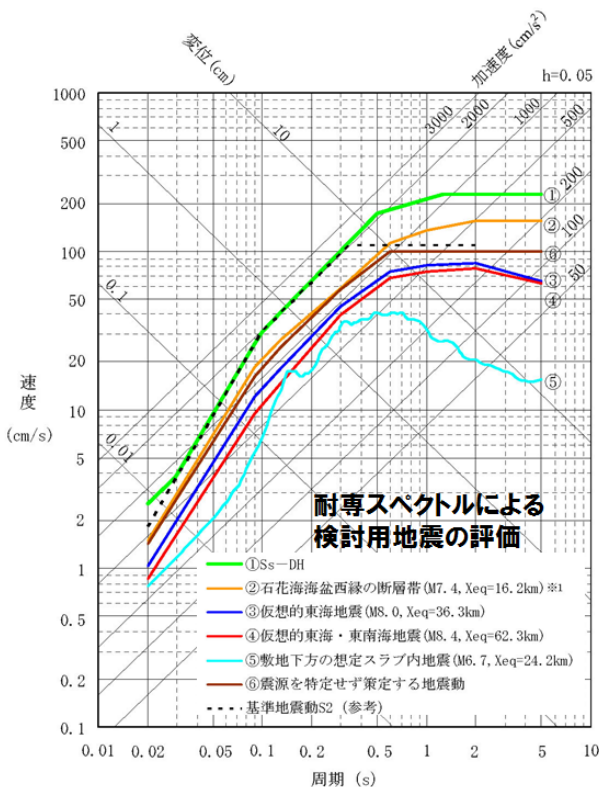


図 19: 浜岡原発での耐専スペクトルによる検討用地震の評価結果 [2] (④仮想的東海・東南海地震 (赤線) は③仮想的東海地震 (青線) を含むにもかかわらず、耐専スペクトルが小さいという矛盾した結果になっている)

ら 62.3km へ一層大きくなるため、震源が遠ざかるかのように見なされてしまうからである。これは、等価震源距離で応答スペクトルを整理しているために生じる耐専スペクトルの構造的な欠陥であり、市来断層帯市来区間のように震源断層の法線方向に原発が位置するような場合にはこのよう

なことは起こらない。

これより、市来断層帯飯海峡中央区間区間と飯断層帯飯区間の耐専スペクトルは過小評価になっており、断層モデルとの差が縮まっているのは見かけだけであることがわかる。これを踏まえた上で、断層モデルによる地震動評価がなぜ耐専スペクトルの 1/2~1/3 に過小評価されるのかという問題に移ろう。

4 断層モデルによる地震動過小評価

断層モデルによる地震動の過小評価は、(1)活断層によって生じる地震規模を実際より 1/2 以下に過小評価することによってもたらされる場合と、(2)アスペリティの平均応力降下量を直接小さく設定する場合の 2 通りがある。関西電力の大飯 3-4 号や高浜 3-4 号では (1) の方法がとられ [27]、四国電力の伊方原発では、(1) の方法に加え、長大な断層に対する評価結果を都合良く解釈して (2) の方法もとられている [26]。川内 1-2 号では、一見すると地震規模を大きく考慮しているとみせかける姑息なテクニックが使われている。九州電力は、M6 クラスの小地震の地震モーメントを過小設定することでアスペリティ平均応力降下量を小さく求め、それを M7.2 ないし M7.5 の大地震にそのまま適用することで (2) の方法を用い、地震規模が大きくなると (1) の方法も追加するという巧妙なテクニックを使っている。その詳細は今の原子力規制委員会による適合性審査会合では具体的に説明されず、2010 年の原子力安全委員会でも明らかにされていた [14]。

その詳細は表 2 および表 3 の通りだが、簡単に述べると以下の通りである。

まず、(1) 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震 (図 20, 図 21 参照) に関する三宅ら (1997)[23] による本震と余震の観測地震波形の関係を用いて、「菊地・山中 (1997)[9] による本震の地震モーメント」から本震のアスペリティ平均応力降下量を求める。

次に、(2) 震源断層のパラメータ間の関係式を用いて、「三宅ら (1997)[23] によるアスペリティ面積」から断層面積と断層平均応力降下量を求める。

(3) 得られた応力降下量をそのまま「地震動評価

表 2: 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震のアスペリティ平均応力降下量を求める手順 *1[14]

	余震 No.6	余震 No.7	余震 No.8
(a) 本震の地震モーメント M_0 [Nm]	9.0×10^{17}		
(b) 本震/余震のモーメント比 M_0/m_0 [Nm]	16.7	5671	123.4
① 余震の地震モーメント m_0 [Nm]	5.39×10^{16}	1.59×10^{14}	7.29×10^{15}
(c) 余震のコーナー振動数 f_{ca} [Hz]	0.47	5.87	1.43
② 余震の応力降下量 $\Delta\sigma_{CR}$ [MPa]	1.58	9.07	6.03
(d) 本震/余震の応力降下量比 C	9.54	1.93	2.50
③ 本震の応力降下量 $\Delta\sigma_a$ [MPa]	15.08	17.51	15.07 (平均 15.9)

*1: ここでの本震は 1997 年 5 月 13 日 14:38 に発生した鹿児島県北西部地震 M6.3 であり, 図 20 の No.5 および図 21 の L 字型震源分布屈曲点付近の○に対応する. その余震は, 図 20 の No.6(M4.7, 1997/5/14/08:32), No.7(M3.4, 1997/5/18/17:49), No.6(M4.2, 1997/5/25/06:10) の 3 つである. 三宅ら (1999)[23] は近地強震波形解析 (注 1) の一手法である経験的グリーン関数法 (余震の観測波形から本震の観測波形を再現する手法) に基づき, K-NET の地震観測点における本震と余震の観測波形から観測震源スペクトル比関数の残差平方和が最小になるように, 上表の (b) 本震/余震のモーメント比 M_0/m_0 , (c) 本震と余震の各コーナー振動数 f_{cm} と f_{ca} を求め, (d) 応力降下量比 $C = (M_0/m_0)(f_{cm}/f_{ca})^3$ を求めている. 九州電力はこれらの値に基づき, 余震の応力降下量 $\Delta\sigma_{CR}$ を Brune(1970) の式 $[\omega_{ca} = 2\pi f_{ca} = 2\beta\sqrt{\pi\lambda_{CR}\Delta\sigma_{CR}/m_0}]$ と円形クラック式 $\Delta\sigma_{CR} = 7m_0/(16\lambda_{CR}^3)$ — 結局, $\Delta\sigma_{CR} = (m_0 f_{ca}^3/\beta^3)\sqrt{16\pi^3/7}$ となる — より求めている. ただし, ここでは S 波速度を $\beta = 3.1\text{km/s}$ としている. 結局, ① $m_0 = (a)/(b)$, ② $\Delta\sigma_{CR} = ① \times (c)^3 \times \text{係数}$, ③ $\Delta\sigma_a = ② \times (d)$ より, 本震の地震モーメント (a) を代入すれば, 本震のアスペリティ平均応力降下量が自動的に得られ, その値は本震の地震モーメントに比例して大きくなる. 本震の地震モーメントは遠地実体波解析 (注 1) で得られており, the Global CMT project による $1.42 \times 10^{18}\text{Nm}$ (Mw6.0), 九州大学理学部島原地震火山観測所 (1997)[10] による $1.2 \times 10^{18}\text{Nm}$ (Mw6.0), 菊地・山中 (1997)[9] による $0.90 \times 10^{18}\text{Nm}$ (Mw5.9) の 3 つがある. ただし, 九州大学の値は九州大学福江地震観測点 (FUK) の広帯域地震計 STS-2 (広い周波数範囲にわたって地震動を記録できる) の上下変位波形から推定された値である. これらを上表に適用すれば, 本震のアスペリティ平均応力降下量はそれぞれ 25.1MPa, 21.2MPa, 15.9MPa になる. 九州電力はこのうち最小の 15.9MPa を選択し, M7.2~M7.5 という大きな地震の地震動解析にそのまま適用したのである. ところが, 最後の菊地・山中 (1997) が示した本震の地震モーメントは, 本震を構成する 2 つのイベントのうち, 東西方向の断層による地震モーメントに最初に破壊した南北方向の断層による地震モーメントの重なった部分を加算したものであり, 東西断層と南北断層で起きた 2 つのイベントの総和ではないと推定される (詳しくは注 2 参照).

表 3: 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震の断層面積と断層平均応力降下量を求める手順 *1[14]

	東西方向の断層	南北方向の断層	両断層の総和
(e) アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ [MPa]	15.9		
(f) アスペリティ面積 S_{ai}, S_a [km ²]	12	12	24
(g) 地震モーメント M_{0i} [Nm]	4.5×10^{17}	4.5×10^{17}	9.0×10^{17}
④ 断層面積 S_i, S [km ²] (アスペリティ面積比 $S_{ai}/S_i, S_a/S$)	33.1 (0.364)	33.1 (0.364)	66.2 (0.364)
⑤ 断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ [MPa]	5.8	5.8	5.8

*1: 九州電力は, 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震が二重震源になっている [9, 23] ことから, 東西方向の断層と南北方向の断層に 2 分し, 表 2 のアスペリティ平均応力降下量 15.9MPa, 三宅ら (1999)[23] のアスペリティ面積 (各 12km² で計 24km²) および菊地・山中 (1997)[9] の地震モーメント $9.0 \times 10^{17}\text{Nm}$ を用いて各断層の面積 S_i と平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を求めている. 具体的には, 円形クラック式 $\Delta\sigma = (7/16)M_0/(S/\pi)^{1.5}$ と Madariaga(1979) の式 $[\Delta\sigma_a = (S/S_a)\Delta\sigma]$ より, $S = \pi^3(7M_0/(16\Delta\sigma_a S_a))^2$ となることから, 各断層面積が得られ, 断層平均応力降下量も Madariaga(1979) の式から得られる. ここで, 地震モーメントを $0.90 \times 10^{18}\text{Nm}$ から $1.2 \times 10^{18}\text{Nm}$ および $1.42 \times 10^{18}\text{Nm}$ から $0.90 \times 10^{18}\text{Nm}$ に置換えると, $(S, S_a/S, \Delta\sigma, \Delta\sigma_a)$ はそれぞれ (66.2km², 0.364, 7.7MPa, 21.2MPa) および (66.2km², 0.364, 9.1MPa, 25.1MPa) に変わる. これより, 地震モーメントを変えると応力降下量は大きく変わるが, 断層面積とアスペリティ面積比は変わらないこと, しかし, アスペリティ面積比が 36.4% と異常に大きいことがわかる. このアスペリティ面積比を小さくするには, アスペリティ面積を少し変えればよい. そこで, アスペリティ面積を 20~22km² へ少しだけ小さくすると, 面積比は 21.0~28.0% と経験式にあう程度に変わる. これを地震モーメントのそれぞれについて求めたのが, 下表である.

表 4: 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震のアスペリティ面積, 断層面積と応力降下量の関係

$(S_a, S, S_a/S)$ [km ²]	$(\Delta\sigma, \Delta\sigma_a)$ [MPa]		
	$0.90 \times 10^{18}\text{Nm}$	$1.2 \times 10^{18}\text{Nm}$	$1.42 \times 10^{18}\text{Nm}$
(24, 66.2, 0.364)	(5.8, 15.9)	(7.7, 21.2)	(9.1, 25.1)
(22, 78.6, 0.280)	(4.5, 15.9)	(5.9, 21.2)	(7.0, 25.1)
(21, 86.2, 0.244)	(3.9, 15.9)	(5.2, 21.2)	(6.1, 25.1)
(20.3, 92.4, 0.220)	(3.5, 15.9)	(4.7, 21.2)	(5.5, 25.1)
(20, 95.1, 0.210)	(3.3, 15.9)	(4.5, 21.2)	(5.3, 25.1)

の対象となる活断層の応力降下量」とし、応力降下量から短周期レベルや地震規模を逆算し、震源パラメータを設定する。

(4) 要素地震として「1984年8月15日九州西側海域の地震 (M5.5, M_W 5.3, 図13参照) の観測地震波」を用い、断層モデルにおける地震動解析を経験的グリーン関数法で行う。

これらのすべてにトリックが隠されている。

まず、(1)だが、菊地・山中(1997)[9]による地震モーメント ($0.90 \times 10^{18} \text{Nm}$, M_W 5.9) は本震全体のモーメントではない。本震を構成する東西方向と南北方向の2つの断層のうちの東西断層の地震モーメントに、南北断層の活動が時間的に重なった部分が加算されたものである。詳しくは注2で述べるが、原文にあたれば一目瞭然である。この過ちは2008年バックチェック時の原子力安全・保安院および原子力安全委員会の審議会合でも見過ごされてきた。原子力規制委員会は今回も同じ過ちを繰り返そうとしているが、立ち止まって再検討すべきである。

正しい地震モーメントは、the Global CMT project [4] による $1.42 \times 10^{18} \text{Nm}$ (M_W 6.0) または九州大学理学部島原地震火山観測所(1997)[10] による $1.2 \times 10^{18} \text{Nm}$ (M_W 6.0) である。九州電力は(4)の要素地震の地震モーメントにはthe Global CMT project による $1.02 \times 10^{17} \text{Nm}$ (M_W 5.3) を用いて同様の手法(表2の①→(c)→②)で要素地震の応力降下量を21.02MPaと求めているところから、地震動の過小評価を避けるにはthe Global CMT project による $1.42 \times 10^{18} \text{Nm}$ を用いるべきであろう。そうすれば、アスペリティ平均応力降下量は15.9MPaではなく、1.6倍の25.1MPaになる。

(2)では、アスペリティ面積と断層面積の比が36.4%と異常に大きく、経験値と不整合である。これを正すには、アスペリティ面積を三宅ら(1997)に含まれる誤差を考慮して24km²から20~22km²へ少しだけ小さくすればよい。表4に示すとおり、 $S_a = 20.3 \text{km}^2$ にすれば、アスペリティ面積比はちょうど平均的な経験値22.0%になり、断層面積は $S = 92.4 \text{km}^2$ 、断層平均応力降下量は $\Delta\sigma = 5.5 \text{MPa}$ になる ($M_0 = 1.42 \times 10^{18} \text{Nm}$ と $\Delta\sigma_a = 25.1 \text{MPa}$ を仮定)。この断層面積は九州電力による

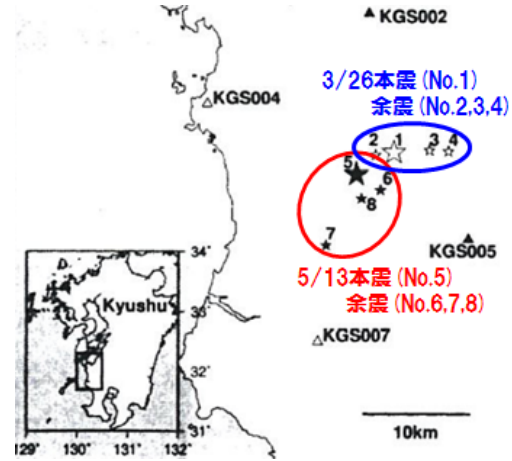


図20: 1997年3月26日と5月13日の鹿児島県北西部地震の本震と余震の分布 [23]

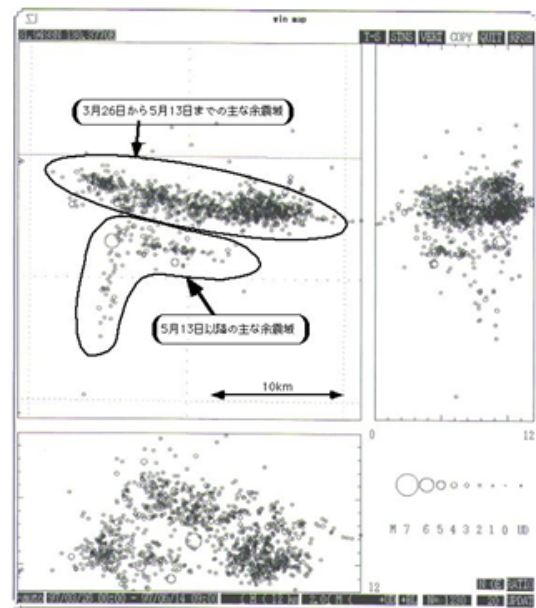


図21: 1997年鹿児島県北西部地震における3月26日から5月14日9時までの震源分布 ($M \geq 2$) [10]

66.2km²の1.4倍だが、菊地・山中(1997)が示した東西方向の断層(10km×5km)とそれよりやや小さいと推定されている南北方向の断層を加えた面積にほぼ等しい。九州電力はHorikawa[5]の震源断層(8km×10km, 9km×10km)をわざわざ引用しているが、自身の導出した断層面積がこの39%に過ぎないという事実を前にして何も矛盾を感じなかったのであろうか。

(3)では、断層が地震発生層下端に達していない「未飽和断層」と断層が地震発生層上端と下端の間に広がりきって、横に長く伸びた状態にある「飽和断層」とではスケーリング則が異なる。にもかかわらず、未飽和断層で得られた応力降下量

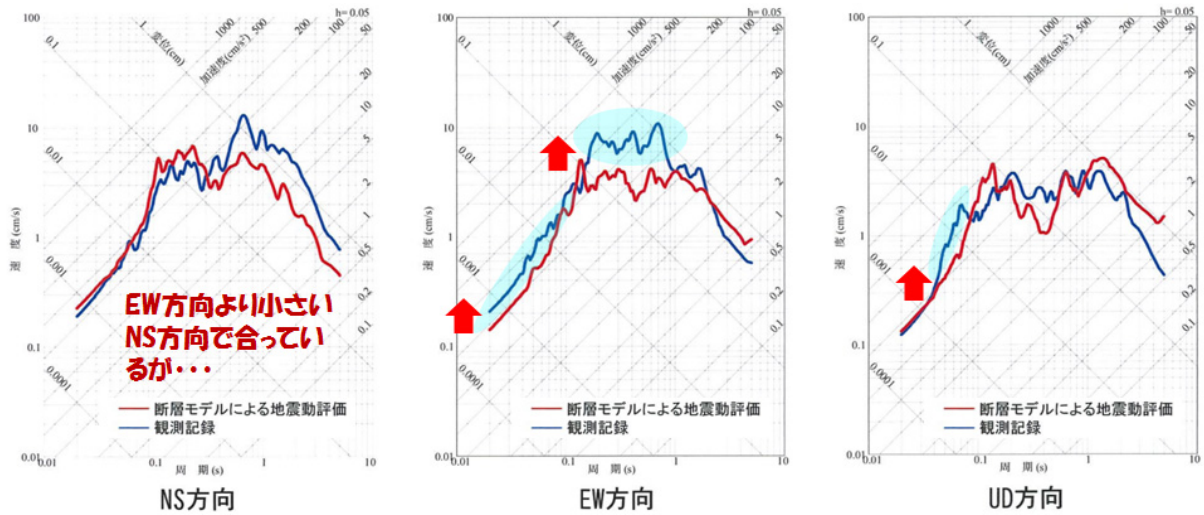


図 22: 九州電力の特性化震源モデルによる 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震の再現計算 [17]

をそのまま飽和断層の応力降下量として採用（固定）して良いかどうかは十分な検討が必要である。通常の断層モデルによれば、未飽和断層では、震源断層の大小にかかわらず応力降下量は一定であり、九州電力の設定した川内 1.2 号の条件（S 波速度 $\beta = 3.5\text{km/s}$ など表 7 に記載の条件）の下では $\Delta\sigma = 2.3\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.6\text{MPa}$ となる。つまり、1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震に対して九州電力が求めたアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ は、通常の断層モデルのレベルと同等であり、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$ が 2.5 倍になってはいるが、背景領域の面積が通常より狭く、実効応力が 2.5MPa と通常以下になるため、地震動評価にはほとんど影響してこない。アスペリティ面積が異常に大きくなるためその効果が出る程度にすぎない。実際、この特性化震源モデルによる地震波再現結果は、図 22 のように、東西 EW 方向より小さい南北 NS 方向の波形こそ短周期側で良く合っていると言えるが、短周期側がより大きい EW 方向の波形がうまく再現できておらず、上下 UD 方向も同様である。上述したように、 $\Delta\sigma = 5.5\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 25.1\text{MPa}$, $S = 92.4\text{km}^2$, $S_a = 20.3\text{km}^2$ （アスペリティ平均応力降下量は 60% 増になるが、アスペリティ面積は 15% 減になる）と設定し直した方がより良く再現できると考えられる。また、1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震を含む観測地震波と耐専スペクトルとの応答スペクトル比（図 8 の実線）を見れば、内陸地殻内地震の平均レベルを表す破線より大きく、1 に近

い部分が多いことがわかる。これは、この地域における地震の震源特性が他の地域より大きいことを示唆しており、川内 1.2 号周辺の震源断層では通常の内陸地殻内地震より大きめのアスペリティ平均応力降下量を設定すべきだと言える。さらに、最近国内で起きている M7 クラスの地震ではアスペリティ平均応力降下量が $20\sim 30\text{MPa}$ のものが多く [27, 26]、このレベルであれば、飽和断層のアスペリティ平均応力降下量として固定しても妥当と言えよう。

最後に (4) だが、(1) への批判で述べたとおり、要素地震として採用された 1984 年 8 月 15 日九州西側海域の地震モーメントは the Global CMT project による値を用い、応力降下量を 21.02MPa としている。ところが、1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震の地震モーメントには the Global CMT project の値よりかなり小さな値を採用して、アスペリティ平均応力降下量を 15.9MPa と求めている。単純に言えば、要素地震の観測地震波形にこれらの応力降下量の比を掛けたものを要素地震波とするため、この比の値が小さければ地震動は過小評価される。「評価すべき震源断層のアスペリティ応力降下量はできるだけ小さく設定し、要素地震の応力降下量はできるだけ大きく設定する」— こうすれば、地震動は大幅に過小評価できる。これが九州電力の用いた「最終的な地震動過小評価の方程式」である。

しかし、この先にもっと悪質なトリックがある。九州電力は表 7, 表 9, 表 12 の全基本ケースで、

応力降下量を $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ に固定し、地震モーメント M_0 および短周期レベル A をこれらの値から逆算し、見かけ上地震規模を大きく設定したかのように見せている。それは、1997年5月13日鹿児島県北西部地震に対し、同じ手法で「断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ (アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ ではない!) から地震モーメントを逆算すると、 $1.28 \times 10^{18}\text{Nm}$ になり、元の $0.90 \times 10^{18}\text{Nm}$ よりかなり大きくなる」ことで明らかだ。つまり、見かけは地震規模が地震調査研究推進本部で用いられている松田式による地震規模に近づいているが、アスペリティ平均応力降下量はこの地震規模とは無関係に小さく設定されているのである。表7の「松田式からM7.2とした場合」や表9と表12の「 M_0 を九電の値とした場合」の「 $S_a/S = 0.22$ 法」の列に、地震規模だけを変えた断層モデルによる計算結果を記したが、いずれも $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ 程度に大きいことがわかって、地震規模を引き上げた結果がアスペリティ応力降下量の増大につながらなければ地震動は過小評価されるのである。ただし、100km以上の長大な断層になると、スケーリング則が変わり、地震規模が大きくなってもアスペリティ応力降下量が増えるとは限らない。

さらに、九州電力は表8、表10、表13の「応力降下量の不確かさ考慮ケース」において、通常は応力降下量と短周期レベルを1.5倍にすべきところ、1.25倍に留めている。その理屈は、「アスペリティ面積が異常に大きいため、逆算した短周期レベルが通常より1.2倍²になっている」ことから1.25倍すれば、通常の1.5倍になるというものである。ところが、応力降下量は「通常の場合が $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ 程度」であり、「九州電力の $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ 」と比べると、断層平均の $\Delta\sigma$ は同じだが、アスペリティ平均の $\Delta\sigma_a$ は63%程度に過ぎない。にもかかわらず、「短周期レベルと同様に、応力降下量についても1.25倍でよい」としているが、これではアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ は通常レベルの3/4程度にしかならない。結果として、 $\Delta\sigma_a = 19.875\text{MPa}$

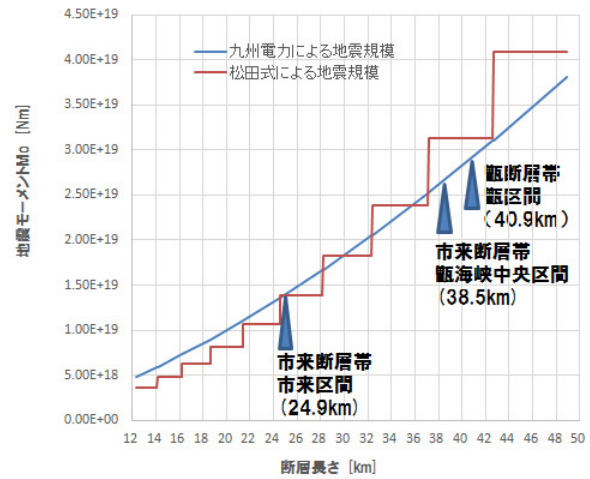


図 23: 九州電力による地震規模と松田式による地震規模の比較

にしかならず、原子力安全・保安院が不確かさ考慮の基準としていた 20MPa [19]すら超えない。 19.875MPa という「有効桁数を無視した小数点以下3桁の数字」からは、地震動過小評価のために何としてもアスペリティ平均応力降下量の引き上げを回避したいという九州電力の執念を感じさせる。

最後に、九州電力による「応力降下量の固定と地震規模の逆算」方式は決して松田式による地震規模には近づかないということを付け加えておく。表11の甕断層帯甕区間「震源断層の拵がり考慮ケース」では松田式による地震規模の70%にとどまる。図23に示すように、松田式は小数点以下1桁で丸めるため階段状になるが、活断層の長さが長くなればなるほど、この乖離は顕著になる傾向にある。したがって、活断層が長くなればなるほど、アスペリティ平均応力降下量を小さく固定する効果に加えて、地震規模を過小算定する効果が付け加わり、より一層の過小評価が顕在化してくるのである。

九州電力による地震動過小評価のトリックは実に狡猾かつ悪辣である。最初から最後まで一貫して、明確な意図を持って行っていると思えない。にもかかわらず、「川内1-2号は原子力規制委員会の言うことを素直に聞く優等生だ」ともてはやすマスコミもいるが、そう主張する前に、九州電力が実際にやっている地震動過小評価のトリックを直視すべきである。

地震規模は断層長さから松田式で求め、断層モデルをそれに合わせるべきであるし、百歩譲って、

²表5の「松田式からM7.2とした場合」や表8と表12の「 M_0 を九電の値とした場合」の短周期レベル A の値と同表「九州電力」の列の A の値を比較する。

九州電力の主張にそってアスペリティ応力降下量を固定するのであれば、25.1MPaに設定し、地震動解析を一からやり直すべきであろう。そうすれば、断層モデルによる地震動評価結果が、耐専スペクトルの1/2~1/3になるという現在の過小評価状態から脱することができ、今の基準地震動を大幅に超えるであろうことは間違いない。

5 まとめ

川内1・2号は今、原子力規制委員会による審査書案作成段階にあり、「再稼働に向けた新基準適合性審査の最先頭を走っている」と言われている。しかし、九州電力による川内1・2号の地震動評価には次のような解決すべき根本問題がある。

第1に、九州電力はその基準地震動を270ガルから370ガル、540ガルと小出しに引き上げてきたが、それは全原発に共通した「M6.5の直下地震」や「震源を特定せず策定する地震動」の導入によって余儀なくされたにすぎず、周辺活断層を積極的に評価して基準地震動の作成に活かそうと努力した結果ではない。今回の新基準適合性審査への申請書提出時には地震調査研究推進本部による「九州地域の活断層の長期評価(第1版)」が公表されていたにもかかわらず、それを取り入れずに済まそうとした。審査の途中でその取り入れを余儀なくされた結果、周辺活断層の耐専スペクトルが540ガルの基準地震動Ss-1Hのすぐ近くまで上がったが、基準地震動を変更するそぶりを見せていない。620ガルの2004年北海道留萌支庁南部地震の解放基盤波が基準地震動Ss-2として追加されたが、重要な施設への影響がほとんどない地震波形だったため、あくまで補完的なものにすぎず、基準地震動は基本的に変わっていない。

第2に、市来断層帯市来区間の耐専スペクトルは基準地震動Ss-1Hに極めて近く、ほとんど余裕はない。地下で1000ガル超を観測した2008年岩手・宮城内陸地震など最近20年間の国内地震観測記録は耐専スペクトルに反映されておらず、これらを用いて耐専スペクトルを構築し直せば、現在の基準地震動をはるかに超える可能性がある。また、耐専スペクトルは平均的なスペクトルを表す

に過ぎず、「倍半分」のバラツキ(偶然変動)を考慮する必要がある。市来断層帯甕海峡中央区間や甕断層帯甕区間は原発から遠方へ伸びる断層であり、耐専スペクトルでは応答スペクトルが過小評価される傾向があり、それを考慮に入れて地震動評価を行う必要がある。したがって、少なくとも今の耐専スペクトルから2倍の余裕をもつように基準地震動を設定し直す必要がある。

第3に、九州電力による断層モデルを使った地震動評価結果は、とくに市来断層帯市来区間では、耐専スペクトルの1/2~1/3にすぎない。これは、アスペリティの平均応力降下量を15.9MPaと小さく設定したためである。その根拠になったものは、東西と南北の2断層がほぼ同時に活動した1997年5月13日鹿児島県北西部地震の震源パラメータだが、菊地・山中論文(1997)が「東西断層を中心とした活動に関する地震モーメント」を記載しているにもかかわらず、九州電力はこれを「2断層による活動全体の地震モーメント」だと曲解し、アスペリティ平均応力降下量を小さく算出した。the Global CMT projectによる地震モーメントを使えば25.1MPaになるべきところ、九州電力は15.9MPaに小さく設定したのである。しかも、断層平均応力降下量を5.8MPaと通常より大きく設定し、この値から逆算すれば地震規模が大きくなることを利用して、アスペリティ応力降下量はその規模に見合ったものであるかのように装った。さらに、応力降下量の不確実さとして1.5倍化を考慮すべきところ、短周期レベルだけを比較して1.25倍に留めた。このように、本来なら、地震調査研究推進本部による活断層の長期評価と同様に、断層の長さから松田式で地震規模を算出し、それに合うよう震源パラメータを大きく設定すべきところ、九州電力は他のどの電力会社も行っていない特殊なトリックを用いて地震動を過小評価した。1997年5月13日鹿児島県北西部地震の震源パラメータに基づいて応力降下量を固定するのであれば、アスペリティ平均応力降下量を25.1MPa、断層平均応力降下量を5.5MPa、アスペリティ面積比を22.0%として地震動評価を根本的にやり直すべきである。

耐専スペクトルや断層モデルによる地震動過小評価を是正すれば、基準地震動を2倍以上、1000

ガル以上へ大幅に引き上げざるを得なくなるであろう。そうなれば、クリフエッジ（川内1号で1,004gal, 2号で1,020gal）[20]を超えるため、再稼働どころではなくなる。この小論で詳述した九州電力による地震動過小評価のトリックを真剣に検討するならば、地震動評価を抜本的にやり直し、審査を振り出しに戻すことは避けられない。

もし、原子力規制委員会・原子力規制庁がこのまま審査書案を完成させ、「新規制基準に適合している」との判断を下すとすれば、それは「重大な瑕疵を意図的に行う」ことになると言わざるを得ない。そして、また、上記の根本問題が原子力安全・保安院や原子力安全委員会の時代に作られた根本問題そのものであることを踏まえるならば、原子力規制委員会・原子力規制庁もそれを克服できなかったことを意味する。それは同時に、原子力ムラの復活に手を貸し、「規制の虜」を再現することにもつながるであろう。

(注1)

地震を引き起こした震源断層の特徴（震源特性）は、「遠地実体波解析」および「近地強震波形解析」によって求められる。

遠地実体波解析では、震源過程の全体像を把握するため、震央距離が約3,500km~1.1万km（地球の中心からの角度で30~100度）と極めて遠い観測点（20~50地点）でのP波上下動（一部水平動SH波も使用）波形を用いる。遠地での観測記録になるため、短周期地震波が減衰して比較的単純な地震波形になる一方、すべり量分布の分解能は劣る。米国地震学連合（IRIS）のデータ管理センターが広帯域地震波形を収集してホームページで公開しており、M. Kikuchi and H. Kanamoriによるプログラム（東京大学地震研究所）も公開されている。1997年鹿児島県北西部地震に関する菊地・山中(1997)[9]による解析結果やthe Global CMT(Centroid-Moment-Tensor) project（the Harvard CMT projectから2006年に移管し現在に至る）によるCMTカタログはこの遠地実体波解析を行ったものである。

近地強震波形解析では、より詳細な震源過程を把握するため、震源域や震央距離が200km以内の比較的近い観測点（最大20地点）の地震波を用い

る。近地観測記録によるため、すべり量分布の分解能は優れているが、地下構造の影響を受けやすい。国内では、1995年兵庫県南部地震以降に拡充された独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET、KiK-net）で強震波形が収集され、公開されている。1997年鹿児島県北西部地震に関する三宅ら(1999)[23]やHorikawa(2001)[5]の解析結果はこの近地強震波形解析を行ったものである。

(注2)

九州電力は、菊地・山中(1997)[9]を引用して、1997年5月13日鹿児島県北西部地震の地震モーメントを $0.90 \times 10^{18} \text{Nm}$ だと主張しているが、これは以下に述べるように、原文を曲解した主張だと言わざるを得ない。

菊地・山中(1997)は1997年3月26日と5月13日の鹿児島県北西部地震について遠地実体波解析を行い、図24の中の図1と図2のようなCMT解を得ている。3月26日の地震は普通の左横ずれ断層だが、5月13日の地震は図24の中の図4およびその鳥瞰図3のようにL字型の二重震源になっている。5月13日の地震は3月26日の震源断層近くで発生したため、その余震と見なされている。そのため、表5では、3月26日の地震は「本震」と呼ばれ、5月13日の地震は「余震」と呼ばれている。この表中の「余震」を起こした震源断層の走向は北から時計回りに98度の東西方向である。走向が180度前後の南北方向の断層に関する震源パラメータはここには示されていない。九州電力は、この「余震」が5月13日のL字型の地震そのものだと主張したいのだろうが、震源パラメータの値そのものがそれを否定している。菊地・山中(1997)は、「2つのサブイベントのうち、最初の小さいイベントが南北に走向を持つ断層に（図24の中の図4-a）、2つめが東西方向の断層（図24の中の図4-b）に対応するのではないかと考えられる。いずれにせよ、共役な断層がほぼ数秒遅れで動いたことはまちがいないと思われる。」とし、図24の中の図2のように2つのCMT解とピークが2つある震源時間関数を示している。つまり、5月13日の地震が南北方向と東西方向の2つの断層による2つのイベントで構成されることを明確に認識

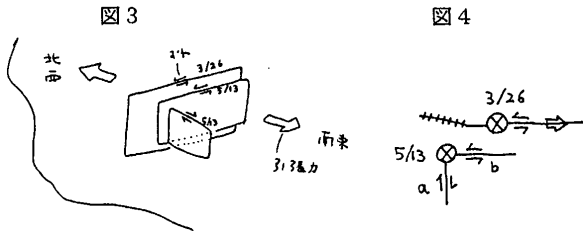
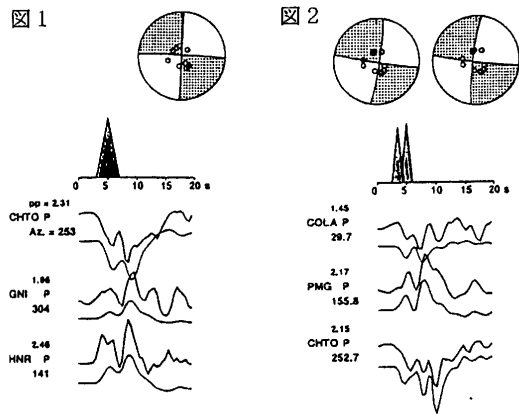


図 24: 1997 年 3 月 26 日と 5 月 13 日の鹿児島県薩摩地方の地震の震源過程 [9]

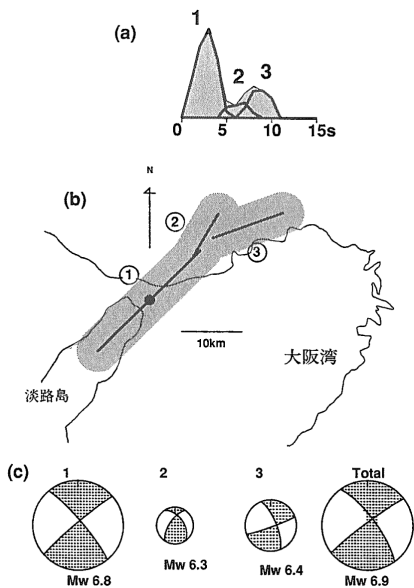


図 25: 1995 年兵庫県南部地震における遠地の地震記録の解析による震源の破壊過程 [8]

していたのである。そうであれば、菊地自身 [8] が 1995 年兵庫県南部地震について行った図 25 および表 6 のように、サブイベントごとに震源パラメータを解析し、全体の震源パラメータを別途示して示すべきである。そうしなかったのは、2つのイベントが空間的に近すぎ、時間的にも重なり合う部分があって、完全に分離できなかったためだと推定される。その結果、東西方向の断層の震源パラメータを示しながら、その地震モーメント

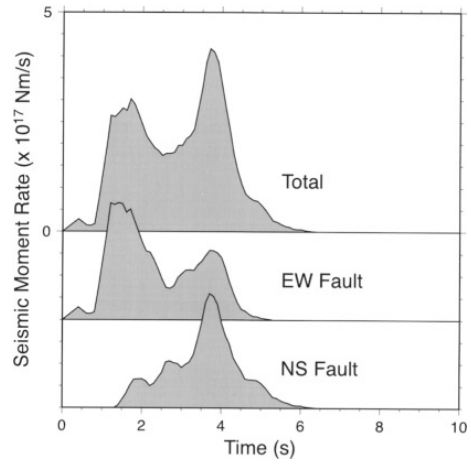


図 26: 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震の地震モーメント解放率の関数 [5]

については南北断層によるイベントとの重なりを認識しながら、明確に最初のイベントのものだと思われる部分を切り取り、残りの部分の地震モーメントを「余震」の地震モーメントとして記載したのではないかと考えられる。

では、最初のイベントの切り取られた地震モーメントはどの程度であろうか。これを評価するためには、両断層を完全に分離して評価した Horikawa(2001)[5] による近地強震波形解析の結果を用いる必要がある。Horikawa(2001) は、菊地・山中(1997)とは異なり、東西断層が先に破壊され、その 3 秒後に南北断層が大きく破壊されたと推定しており、破壊の順序が異なるものの、図 26 のように両断層の破壊過程は後段で重なり合っている。両断層による地震モーメント解放率の重なりが少ない最初の 2.5 秒間のモーメント解放量は全体の 20~30% であり、これに相当する部分が切り取られたとすれば、両断層による全体の地震モーメントは $1.1 \sim 1.3 \times 10^{18} \text{Nm}$ になると推定される。これは、3月26日の地震とほぼ同等になり、九州大学理学部島原地震火山観測所による推定結果(3月26日 $1.3 \times 10^{18} \text{Nm}$ [10], 5月13日 $1.2 \times 10^{18} \text{Nm}$ [11])とも整合する。

参考文献

[1] Brune, J. N.,(1970): Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75, 4997-5009.
 [2] 中部電力(1998): 浜岡原子力発電所原子炉設置変更許可申請書(5号原子炉の増設)本文および添付書類, 図4-8(1997.4, 1998.4 一部補正)

表 5: 1997 年鹿児島県薩摩地方の地震の震源パラメータ *1[9]

地震	(strike, dip, rake) (走向, 傾斜角, すべり角)	地震モーメント M_0 Nm	T sec	断層面積 S km×km	H km	食い違い D m	$\Delta\sigma$ MPa
本震	(273, 88, 0)	1.2×10^{18} (M_W 6.0)	4.0	15 × 7.5	7	0.4	2.6
余震	(98, 88, -1)	0.90×10^{18} (M_W 5.9)	3.5	10 × 5.	8	0.6	6.4

*1: 「本震」は 1997 年 3 月 26 日鹿児島県北西部地震である。「余震」は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震における東西方向の断層による地震に対応すると考えられるが、九州電力は図 24 における南北方向の断層による地震と合わせた 2 つのイベントからなる 5 月 13 日の地震全体のモーメントとして上表の値 0.90×10^{18} Nm を用いている。しかし、「余震」の走向、断層面積 S 、食い違い D および断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ の各値は東西方向の断層だけに限った震源パラメータを表しており、ここには南北方向の断層に関する震源パラメータは含まれていない。ただし、地震モーメント M_0 については、以下の理由から、東西断層によるものだけではなく、南北断層によるものも部分的に含まれていると考えられる。

菊地・山中 (1997)[9] は、南北方向の断層 (南北断層) による小さなイベントが起きてから数秒遅れで東西方向の断層 (東西断層) によるイベントが起きたと評価しているが、両者の完全分離は想定していないと考えられる。その証拠に、3 つのサブイベントが次々に発生した 1995 年兵庫県南部地震では、図 25 および表 6 のように、各イベントごとに震源パラメータを示した上で、全体の震源パラメータも別途記載している。ところが、上表には南北断層による震源パラメータが記載されておらず、両者を合わせた全体の震源パラメータも示されていない。つまり、最初の南北断層による小さなイベントを除いて、後段の東西断層によるイベントを示したものの、後段のイベントにおける南北断層の地震の寄与を否定できず、また、遠地実体波解析では時空間が接近しすぎて両者の分離評価が困難であるため、後段のイベントの地震モーメントを東西断層によるものとして仮置きしたと考えられる。そのため、南北断層や全体の震源パラメータを東西断層とは別に示すことができなかつたと推定される。Horikawa(2001)[5] によれば、菊地・山中 (1997) とは異なり、東西断層が先に破壊され、その 3 秒後に南北断層が大きく破壊されたと推定しており、破壊の順序が異なるものの、両断層の破壊過程が後段で重なり合っており、完全には分離していない。したがって、上表の東西断層によると評価されている地震モーメントには南北断層による地震モーメントの一部が加算された形になっていると考えられる。なぜなら、Horikawa(2001) によれば、東西：南北の地震モーメントの比は 0.55：0.41 であることから、上表の地震モーメントが東西断層だけの地震モーメントを表しているとすれば大きすぎるからである。また、三宅ら (1999)[23] は、菊地・山中 (1997) と同様に南北断層が先に破壊し東西断層が 2 秒遅れで破壊したと推定した上で、これらの地震モーメントの比を第 1 震 (南北断層)：第 2 震 (東西断層) = 1:1 または 0.9:1 と推定しており、Horikawa(2001) の結果とも整合する。破壊順序の違いは、震源位置 (発震点, hypocenter) を東西断層と南北断層の境界に置く菊地・山中 (1997) および三宅ら (1999) で「南北-東西」の順になり、東西断層上に置く Horikawa(2001) では「東西-南北」の順になるようだが、ここでは深く立ち入らない。Horikawa(2001) の図 26 によれば、両断層による地震モーメント解放率の重なりが少ない最初の 2.5 秒の間に解放された地震モーメントは全体の 20~30% であることから、上表の地震モーメントを全体の 70~80% に相当するとみなせば、両断層による全体の地震モーメントは $1.1 \sim 1.3 \times 10^{18}$ Nm になると推定される。これは、3 月 26 日の地震とほぼ同等になり、九州大学理学部島原地震火山観測所による推定結果 (3 月 26 日 1.3×10^{18} Nm[10], 5 月 13 日 1.2×10^{18} Nm[11]) とも整合する。

ちなみに、 T は破壊継続時間、 H は震源深さであり、食い違い D は剛性率 μ を 30GPa として $D = M_0/(\mu S)$ で求められ、断層平均応力降下量は $\Delta\sigma = (7/16)M_0/(S/\pi)^{1.5} \approx 2.5M_0/S^{1.5}$ で求められている。このように有効数字 1~2 桁の簡略化された値や式を用いているのは速報性を重視しているからであり、その適用に際してはそこに含まれる大きな不確かさを考慮する必要がある。

表 6: 1995 年兵庫県南部地震の震源パラメータ *1[8]

サブイベント	メカニズム (走向, 傾斜角, すべり角)	地震モーメント Nm	継続時間 sec	断層面積 km×km	食い違い m (水平, 垂直)
# 1	(229, 86, 171)	1.81×10^{19} (M_W 6.8)	0 - 6	24 × 12	2.1 (2.1, 0.3)
# 2	(214, 66, 136)	0.30×10^{19} (M_W 6.3)	4 - 9	9 × 4.5	2.5 (1.8, 1.7)
# 3	(70, 85, -162)	0.59×10^{19} (M_W 6.4)	6 - 11	12 × 6	2.7 (2.6, 0.8)
Total	(233, 85, 165)	2.50×10^{19} (M_W 6.9)	0 - 11		

*1: サブイベント#1~3 および Total は、図 25 のサブイベント#1~3 および Total にそれぞれ対応する。

[3] 中部電力 (2007): 浜岡原子力発電所 4 号機「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報告書および別冊 (2007.1)

[4] the Global CMT project <http://www.globalcmt.org/>

[5] Horikawa, H.(2001): Earthquake Doublet in Kagoshima, Japan: Rupture of Asperities in a Stress Shadow, Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 1, 112-127.

[6] 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%)」

[7] 関西電力 (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)

[8] 菊地正幸 (1995): 兵庫県南部地震の震源過程モデル- 遠地の地震波解析速報 -, 地震ニュース 486 号, 12-1.

[9] 菊地正幸・山中佳子 (1997): 97 年 3 月 26 日鹿児島県薩摩地方の地震の震源過程, 1997 年日本地震学会秋季大会講演予稿集 No.2, P81.

[10] 九州大学理学部島原地震火山観測所 (1997): 1997 年 5 月 13 日に発生した鹿児島県北西部地震 (M6.3) について, <http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/kenkyu/kag5-13p.html>

[11] 九州大学理学部島原地震火山観測所 (1997): 1997 年 3 月 26 日に発生した鹿児島県北西部地震 (M6.5) について, <http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/kenkyu/kag.html>

- [12] 九州電力 (2007) : 当社原子力発電所の主要施設の概略影響検討結果 (概要) (2007.9.20)
- [13] 九州電力 (2008) : 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う玄海及び川内原子力発電所の耐震安全性評価結果 (中間報告) について (2008.3.31)
- [14] 九州電力 (2010) : 川内原子力発電所基準地震動 S_s の策定について, 原子力安全委員会・九州電力株式会社川内原子力発電所の原子炉の設置変更に係る調査審議 (第3回会合), 参考資料第3-1号 (2010.10.29)
- [15] 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)
- [16] 九州電力 (2013) : 川内原子力発電所・玄海原子力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59回原子力発電所の新規制基準適合性に関する審査会合, 資料3 (2013.12.18)
- [17] 九州電力 (2014) : 川内原子力発電所 基準地震動の策定について (コメント回答), 第92回原子力発電所の新規制基準適合性に関する審査会合資料3-1(2014.3.12)
- [18] 原子力安全・保安院 (2012) : 「活断層による地震動評価の不確かさの考慮に係る考え方の整理 (案)」に対する各委員からのコメントについて, 第5回地震・津波に関する意見聴取会 (地震動関係), 資料5-2(2012.6.19)
- [19] 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)
- [20] 原子力安全・保安院 (2012) : 九州電力川内原子力発電所1号機及び2号機の安全性に関する総合的評価 (一次評価) に関する審査結果取りまとめ (2012.9.3)
- [21] 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)
- [22] Madariaga, R. (1979) : On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *Journal of Geophysical Research* 84, 2243-2250
- [23] 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎 (1999) : 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日 ($M_{JMA}6.5$) 及び5月13日 ($M_{JMA}6.3$) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震第2輯, 第51巻, 431-442.
- [24] 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>,
- [25] 長沢啓行 (2009) : 島崎邦彦氏による震源断層と活断層の新しい関係 「孤立した短い活断層」の評価と「震源を特定せず策定する地震動」を見直すべき, 若狭ネット第118号, 15-17(2009.3.10) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/118/118b2.pdf>
- [26] 長沢啓行 (2013) : 伊方原子力発電所の耐震安全性は保証されていない, 伊方訴訟 (四国電力株式会社に対する伊方原発運転差止請求事件) に関連して松山地方裁判所民事第2部へ提出した意見書 (2013.12.26 記)
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/ikata-ikensho.pdf>,
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/ikata-bessatu.pdf>
- [27] 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>
- [28] 長沢啓行 (2014) : 手法古すぎる原発地震動評価, 2014年5月1日付け毎日新聞朝刊, オピニオン「発言」欄
- [29] 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)
- [30] 島崎邦彦 (2008) : 震源断層より短い活断層の長期予測, 日本活断層学会 2008 年度秋季学術大会予稿集 S-05
- [31] 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013) : 九州地域の活断層の長期評価 (第一版) (2013.2.1)
- [32] 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)
- [33] 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)
- [34] 若狭ネット編集局 (2008) : 「わかさ」ちゃんと「ママ」のひとこと談議 耐専スペクトルのここがヘン!?, 若狭ネット第114号, 6-16(2008/8/1)
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/114/114c.pdf>
- [35] 若狭ネット編集局 (2014) : 「高浜3-4号, 大飯3-4号, 川内1-2号の地震動評価に関する2014年3月18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/appeal20140324.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140318r.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140318m.pdf>
<http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140324.pdf>

表 7: 市来断層帯市来区間の断層パラメータ

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	松田式から M7.2 とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	24.9km (M7.2 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	323.7 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ東下端 1 種類 + 断層東下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	1.39×10^{19} N·m	5.83×10^{18}	1.39×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.2, M_W 6.7	M6.9, M_W 6.4	M7.2, M_W 6.7		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	129.5 cm	54.4 cm	130.0 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa	2.44 MPa	5.83 MPa		
短周期レベル A	1.53×10^{19} N·m/s ²	9.54×10^{18}	1.28×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ 全体	面積 S_a	118.08 km ² (0.365)	51.64 (0.16)	165.04 (0.51)	71.21 (0.22)
	地震モーメント M_{0a}	1.02×10^{19} N·m	1.87×10^{18}	1.43×10^{19}	6.16×10^{18}
	平均すべり量 D_a	260.3 cm	109.4 cm	—	261.4
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	15.9 MPa	15.3 MPa	—	26.5
	短周期レベル A_a	1.50×10^{19} N·m/s ²	9.54×10^{18}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	3.70×10^{18} N·m	3.96×10^{18}	—	7.77×10^{18}
	面積 $S_b = S - S_a$	205.62 km ²	272.06 km ²	158.66	252.49
	平均すべり量 D_b	54.4cm	44.0 cm	—	93.0
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.7 MPa	—	5.3
	短周期レベル A_b	3.14×10^{18} N·m/s ²	—	—	—

*1:九州電力は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震 (気象庁発表 M6.4) の特性化震源モデルのパラメータを根拠に $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と固定し, アスペリティ面積を $S_a = S(\Delta\sigma_a/\Delta\sigma)$ より求めている. そのため, アスペリティ面積は断層面積の 36.5% と異常に大きくなっている. これは鹿児島県北西部地震など M6 クラスの未飽和断層のデータを M7 クラスの飽和断層にそのまま適用した結果であり, 両者でスケール則が全く異なることを無視しており, 妥当とは言えない. 応力降下量を固定するため, 通常の断層モデルのレシピは使えない. そこで, 短周期レベルをアスペリティと背景領域に割り当てるものとし, アスペリティの短周期レベルを $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, 背景領域の短周期レベルを $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ で求め, 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より算出している. 地震モーメントも $M_0 = (16/7)\Delta\sigma(S/\pi)^{3/2}$ より逆算しており, 通常の断層モデルより大きくなっている.

*2: 断層モデルのレシピに基づき, 地震モーメントを $M_0 = [S/(4.24 \times 10^{-11})]^2$, 短周期レベルを $A = 2.46 \times 10^{17}M_0^{1/3}$ より求め, 応力降下量を $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$, $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma(S_a/S)$ より算出している (この方法をここでは「A 法」と呼ぶ). これは九州電力が原子力規制委員会の求めに応じて算出した値だが, アスペリティの短周期レベルの値は全体の短周期レベルの値に等しい. にもかかわらず, 背景領域の短周期レベルの値として九州電力は $3.84 \times 10^{18}\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ と算出していた. 断層モデルでは通常, 短周期レベルをすべてアスペリティに割り当てるため, $A_b = 0$ となる. したがって, 九州電力の算出した A_b の値は通常の断層モデルでは無意味であり, 表中では, 「—」としている.

*3: 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ より, 地震モーメント M_0 を求めた. 結果として, 上位 3 桁の数値に丸めると, 九州電力が逆算した地震モーメントの値と一致する. しかし, 常にこうなるわけではない. たとえば, 断層帯帯区間では松田式による場合のほうが約 7% 大きく, 市来断層帯帯海峡中央区間では約 17% 小さく, 断層帯帯区間の震源断層の拡がりの不確かさを考慮した場合には約 30% も小さくなる. 短周期レベルから応力降下量を求める A 法 (*2 参照) では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 地震モーメントが計算上, 全体の地震モーメントを超えるため無意味になる. このような場合には, アスペリティ面積を断層面積の 22% に固定する方法がレシピで推奨されているため, アスペリティ面積を $S_a = 0.22S$ で求め, アスペリティの応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22$ で求めた. これをここでは「 $S_a/S = 0.22$ 法」と呼ぶ. ちなみに, 上表で M_0 を九州電力の値に置換するとパラメータ値は次のように少しだけ変わる: $D = 129.5\text{cm}$, $\Delta\sigma = 5.80\text{MPa}$, $A = 1.27 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$, $M_{0a} = 6.13 \times 10^{18}\text{N}\cdot\text{m}$, $D_a = 260.3\text{cm}$, $\Delta\sigma_a = 26.4\text{MPa}$, $M_{0b} = 7.73 \times 10^{18}\text{N}\cdot\text{m}$, $D_b = 92.5\text{cm}$, $\sigma_b = 5.0\text{MPa}$

表 8: 市来断層帯市来区間の断層パラメータ (応力降下量の不確かさを考慮した場合)

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	M_0 を九電の値とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	24.9km (M7.2 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	323.7 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ東下端 1 種類 + 断層東下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	1.39×10^{19} N·m	5.83×10^{18}	1.39×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.2, M_W 6.7	M6.9, M_W 6.4	M7.2, M_W 6.7		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	129.5 cm	54.4 cm	130.0 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa (8.7 MPa)	3.66 MPa	8.70 MPa		
短周期レベル A	1.92×10^{19} N·m/s ² (2.30×10^{19})	1.43×10^{19}	1.91×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ 全体	面積 S_a	193.95 km ² (0.365)	118.09 (0.222)	269.4 (0.507)	117.0(0.220)
	地震モーメント M_{0a}	2.14×10^{19} N·m	7.02×10^{18}	2.97×10^{19}	1.29×10^{19}
	平均すべり量 D_a	333.6 cm	179.7 cm	—	333.6
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	19.875 MPa (23.85 MPa)	22.9 MPa	—	39.5
	短周期レベル A_a	1.88×10^{19} N·m/s ² (2.25×10^{19})	1.43×10^{19}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	7.79×10^{18} N·m	8.71×10^{18}	—	1.63×10^{19}
	面積 $S_b = S - S_a$	337.75 km ²	413.61 km ²	262.31	414.73
	平均すべり量 D_b	69.7cm	63.6 cm	—	118.6
	実効応力 σ_b	3.125 MPa (3.75 MPa)	4.0 MPa	—	7.5
	短周期レベル A_b	3.92×10^{18} N·m/s ² (4.70×10^{18})	—	—	—

*1: 「応力降下量の不確かさ」を考慮するため、通常は、断層モデルで求めた短周期レベルと応力降下量 (または実効応力) がすべて 1.5 倍になるよう波形合成の際に工夫する。たとえば、上表で九州電力の欄より右側の「断層モデル」や「 M_0 を九電の値とした場合」などでは、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、背景領域実効応力 σ_b および短周期レベル A, A_a, A_b の各値は表 9 の各値の 1.5 倍になっている。ところが、九州電力の欄では表 1 の各値の 1.25 倍にすぎず (1.5 倍の値を括弧内に示す)、しかも、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 5.8$ N·m は 1.25 倍の値 (7.25N·m) にもなっていない。その理由は、表 7 の九州電力の欄の短周期レベルを 1.5 倍すると 2.30×10^{19} N·m/s² になるが、「 M_0 を九電の値とした場合」の値は 1.91×10^{19} N·m/s² にすぎないので、これと同程度であればよく、1.25 倍に留めるというものである。これより、短周期レベルだけでなく応力降下量 (または実効応力) の値も 1.25 倍にすれば「1.5 倍」と同程度であるというのである。それなら、なぜ、応力降下量の値についても「 M_0 を九電の値とした場合」の 1.5 倍の値 (断層平均 8.7MPa とアスペリティ平均 39.5MPa) と同程度に引き上げようとししないのか、その理由を説明すべきであろう。また、九州電力は、1984 年九州西側海域の M5.5 の地震を断層モデルの要素地震として用いており、その応力降下量は 21.02MPa と大きい。「1.5 倍の応力降下量」がこれ以下の値でなぜ「応力降下量の不確かさ」を考慮したといえるのか、説明すべきであろう。

*2: 表 7 の「断層モデル」の欄の「短周期レベル A, A_a 」および「平均応力降下量 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ 」の値を 1.5 倍している。九州電力は、これらの値については断層帯帯区間についてのみ例示しており、市来断層帯については求めていない。

*3: 表 7 の「松田式から M7.2 とした場合 *3」の M_0 を「九州電力」の欄の値に厳密に置き換えて計算し直した場合の「短周期レベル A 」および「平均応力降下量 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ 」の値を 1.5 倍している。九州電力は、これらについては断層帯帯区間についてのみ例示しており、市来断層帯については求めていない。

表 9: 甕断層帯甕区間の断層パラメータ

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	M_0 を九電の値とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	40.9km (M7.5 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	531.7 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ西下端 1 種類 + 断層西下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	2.92×10^{19} N·m	1.57×10^{19}	2.92×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.5, M_W 6.9	M7.2, M_W 6.7	M7.5, M_W 6.9		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	166.0 cm	89.4 cm	166.0 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa	3.12 MPa	5.80 MPa		
短周期レベル A	1.96×10^{19} N·m/s ²	1.33×10^{19}	1.63×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ全体	面積 S_a	193.95 km ² (0.365)	118.09 (0.222)	269.4 (0.507)	117.0(0.220)
	地震モーメント M_{0a}	2.14×10^{19} N·m	7.02×10^{18}	2.97×10^{19}	1.29×10^{19}
	平均すべり量 D_a	333.6 cm	179.7 cm	—	333.6
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	15.9 MPa	14.1 MPa	—	26.4
	短周期レベル A_a	1.92×10^{19} N·m/s ²	1.33×10^{19}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	7.79×10^{18} N·m	8.71×10^{18}	—	1.63×10^{19}
	面積 $S_b = S - S_a$	337.75 km ²	413.61 km ²	262.31	414.73
	平均すべり量 D_b	69.7cm	63.6 cm	—	118.6
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.7 MPa	—	5.0
	短周期レベル A_b	4.02×10^{18} N·m/s ²	—	—	—

*1:九州電力は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震(気象庁発表 M6.4)の特性化震源モデルのパラメータを根拠に $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と固定し, アスペリティ面積を $S_a = S(\Delta\sigma_a/\Delta\sigma)$ より求めている. そのため, アスペリティ面積は断層面積の 36.5%と異常に大きくなっている. これは鹿児島県北西部地震など M6 クラスの未飽和断層のデータを M7 クラスの飽和断層にそのまま適用した結果であり, 両方でスケール則が全く異なることを無視しており, 妥当とは言えない. 応力降下量を固定するため, 通常の断層モデルのレシピは使えない. そこで, 短周期レベルをアスペリティと背景領域に割り当てるものとし, アスペリティの短周期レベルを $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, 背景領域の短周期レベルを $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ で求め(通常の断層モデルでは解析上, $A_b = 0$ としている), 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より算出している. 地震モーメントも $M_o = (16/7)\Delta\sigma(S/\pi)^{3/2}$ より逆算しており, 通常の断層モデルより大きくなっている. また, 九州電力は, 背景領域にも短周期レベルを割り当てているため, アスペリティの応力降下量についても「実効応力」と呼んでいるが, 地震動解析上の差はない.

*2: 断層モデルのレシピに基づき, 地震モーメントを $M_0 = [S/(4.24 \times 10^{-11})]^2$, 短周期レベルを $A = 2.46 \times 10^{17}M_0^{1/3}$ より求め, 応力降下量を $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$, $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma(S_a/S)$ より算出している(この方法をここでは「A 法」と呼ぶ). これは九州電力が原子力規制委員会の求めに応じて算出した値だが, アスペリティの短周期レベルの値は全体の短周期レベルの値に等しい. にもかかわらず, 背景領域の短周期レベルの値として九州電力は $4.70 \times 10^{18}\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ と算出していた. 断層モデルでは通常, 短周期レベルをすべてアスペリティに割り当てるため, $A_b = 0$ となる. したがって, 九州電力の算出した A_b の値は通常の断層モデルでは無意味であり, 表中では, 「—」としている.

*3: 通常の断層モデルにおいて, 地震モーメント M_0 だけを上表の「九州電力」の欄の値に置き換えた場合のパラメータ値を求めている. 九州電力はこのうち短周期レベル A だけを求め, 応力降下量などは算出していない. 短周期レベルから応力降下量を求める注 2 の A 法では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 地震モーメントが計算上, 全体の地震モーメントを超えるため無意味になる. このような場合には, アスペリティ面積を断層面積の 22%に固定する方法がレシピで推奨されているため, アスペリティ面積を $S_a = 0.22S$ で求め, アスペリティの応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22$ で求めた. これをここでは「 $S_a/S = 0.22$ 法」と呼ぶ. ちなみに, 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M7.5 を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ で地震モーメント M_0 を求めると, $M_0 = 3.13 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ となり, 九州電力の値より約 7%大きく, 他のパラメータ値も同程度に大きくなる: $D = 177.6\text{cm}$, $\Delta\sigma = 6.21\text{MPa}$, $A = 1.67 \times 10^{19}$ N·m/s, $M_{0a} = 1.38 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$, $D_a = 357.0\text{cm}$, $\Delta\sigma_a = 28.2\text{MPa}$, $M_{0b} = 1.74 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$, $D_b = 127.0\text{cm}$, $\sigma_b = 5.6\text{MP}$

表 10: 甌断層帯甌区間の断層パラメータ (応力降下量の不確かさを考慮した場合)

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	M_0 を九電の値とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	40.9km (M7.5 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	531.7 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ西下端 1 種類 + 断層西下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	2.92×10^{19} N·m	1.57×10^{19}	2.92×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.5, M_W 6.9	M7.2, M_W 6.7	M7.5, M_W 6.9		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	166.0 cm	89.4 cm	166.0 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa (8.7 MPa)	4.69 MPa	8.7 MPa		
短周期レベル A	2.46×10^{19} N·m/s ² (2.95×10^{19})	1.99×10^{19}	2.45×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ 全体	面積 S_a	193.95 km ² (0.365)	118.09 (0.222)	269.4 (0.507)	117.0(0.220)
	地震モーメント M_{0a}	2.14×10^{19} N·m	7.02×10^{18}	2.97×10^{19}	1.29×10^{19}
	平均すべり量 D_a	333.6 cm	179.7 cm	—	333.6
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	19.875 MPa (23.85 MPa)	21.1 MPa	—	39.5
	短周期レベル A_a	2.40×10^{19} N·m/s ² (2.88×10^{19})	1.99×10^{19}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	7.79×10^{18} N·m	8.71×10^{18}	—	1.63×10^{19}
	面積 $S_b = S - S_a$	337.75 km ²	413.61 km ²	262.31	414.73
	平均すべり量 D_b	69.7cm	63.6 cm	—	118.6
	実効応力 σ_b	3.125 MPa (3.75 MPa)	3.99 MPa	—	7.5
	短周期レベル A_b	5.02×10^{18} N·m/s ² (6.03×10^{18})	—	—	—

*1: 「応力降下量の不確かさ」を考慮するため、通常は、断層モデルで求めた短周期レベルと応力降下量 (または実効応力) がすべて 1.5 倍になるよう波形合成の際に工夫する。たとえば、上表で九州電力の欄より右側の「断層モデル」や「 M_0 を九電の値とした場合」などでは、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、背景領域実効応力 σ_b および短周期レベル A, A_a, A_b の各値は表 9 の各値の 1.5 倍になっている。ところが、九州電力の欄では表 1 の各値の 1.25 倍にすぎず (1.5 倍の値を括弧内に示す)、しかも、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 5.8$ N·m は 1.25 倍の値 (7.25 N·m) にもなっていない。その理由は、表 9 の九州電力の欄の短周期レベルを 1.5 倍すると 2.95×10^{19} N·m/s² になるが、「 M_0 を九電の値とした場合」の値は 2.45×10^{19} N·m/s² にすぎないので、これと同程度であればよく、1.25 倍に留めるといものである。これより、短周期レベルだけでなく応力降下量 (または実効応力) の値も 1.25 倍にすれば「1.5 倍」と同程度であるというのである。それなら、なぜ、応力降下量の値についても「 M_0 を九電の値とした場合」の 1.5 倍の値 (断層平均 8.7MPa とアスペリティ平均 39.5MPa) と同程度に引き上げようとししないのか、その理由を説明すべきであろう。また、九州電力は、1984 年九州西側海域の M5.5 の地震を断層モデルの要素地震として用いており、その応力降下量は 21.02MPa と大きい。「1.5 倍の応力降下量」がこれ以下の値でなぜ「応力降下量の不確かさ」を考慮したといえるのか、説明すべきであろう。

*2: 表 9 の「断層モデル」の欄の「短周期レベル A, A_a 」および「平均応力降下量 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ 」の値を 1.5 倍している。九州電力は、これらの値のうち、断層平均の応力降下量 $\Delta\sigma$ の値 (4.69MPa) だけ求めている。これは、断層平均の応力降下量を 1.25 倍していないことと関係があるようだが、なぜかは不明である。

*3: 表 9 の「 M_0 を九電の値とした場合」の欄の「短周期レベル A 」および「平均応力降下量 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ 」の値を 1.5 倍している。九州電力は、短周期レベルの値は求めているが、応力降下量を 1.5 倍した値 (8.7MPa, 39.5MPa, 7.5MPa) は求めている。

表 11: 甌断層帯甌区間の断層パラメータ (震源断層の拡がりの不確かさを考慮した場合)

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	M_0 を九電の値とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	43.0km (M7.6 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	559.0 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ西下端 1 種類 + 断層西下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	3.15×10^{19} N·m	1.74×10^{19}	3.15×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.5, M_W 6.9	M7.3, M_W 6.8	M7.5, M_W 6.9		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	170.2 cm	93.9 cm	170.2 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa	3.20 MPa	5.80 MPa		
短周期レベル A	2.01×10^{19} N·m/s ²	1.37×10^{19}	1.67×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ全体	面積 S_a	203.91 km ² (0.365)	128.4 (0.230)	283.2 (0.507)	123.0 (0.220)
	地震モーメント M_{0a}	2.31×10^{19} N·m	8.02×10^{18}	3.20×10^{19}	1.39×10^{19}
	平均すべり量 D_a	342.1 cm	188.8 cm	—	342.1
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	15.9 MPa	14.0 MPa	—	26.4
	短周期レベル A_a	1.97×10^{19} N·m/s ²	1.37×10^{19}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	8.39×10^{18} N·m	9.36×10^{18}	—	1.76×10^{19}
	面積 $S_b = S - S_a$	355.09 km ²	430.6 km ²	275.78	436.0
	平均すべり量 D_b	71.5cm	65.7 cm	—	121.6
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.6 MPa	—	5.0
	短周期レベル A_b	4.12×10^{18} N·m/s ²	—	—	—

*1: 甌断層帯甌区間は 3 つの断層が「くの字型+への字型」に曲がって連なっているが、川内原発に近い 2 つの断層が「くの字型」により深く折れて広がっている場合を震源断層の拡がりの不確かさとして考慮している。上表では 3 つの断層の全体についてのパラメータ値を載せており、結果として断層長さや断層面積が変わったことによるパラメータの変化を表している。応力降下量を $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と固定し、アスペリティ面積を $S_a = S(\Delta\sigma_a/\Delta\sigma)$ より求めているのは変わらない。

*2: 断層モデルのレシピに基づき、地震モーメントを $M_0 = [S/(4.24 \times 10^{-11})]^2$, 短周期レベルを $A = 2.46 \times 10^{17} M_0^{1/3}$ より求め、応力降下量を $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$, $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma(S_a/S)$ より算出している (この方法をここでは「A 法」と呼ぶ)。ただし、九州電力はこの不確かさを考慮した場合については、上記の断層モデルによるパラメータ値を示してはいない。

*3: 通常の断層モデルにおいて、地震モーメント M_0 だけを上表の「九州電力」の欄の値に置き換えた場合のパラメータ値を求めている。ただし、九州電力はこの場合に対しても上記のパラメータ値を示してはいない。短周期レベルから応力降下量を求める A 法 (*2 参照) では、アスペリティの面積が大きくなりすぎて、地震モーメントが計算上、全体の地震モーメントを超えるため無意味になる。このような場合には、アスペリティ面積を断層面積の 22% に固定する方法がレシピで推奨されているため、アスペリティ面積を $S_a = 0.22S$ で求め、アスペリティの応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22$ で求めた。これをここでは「 $S_a/S = 0.22$ 法」と呼ぶ。ちなみに、断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M7.6 を求め、 $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ で地震モーメント M_0 を求めると、 $M_0 = 4.09 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ となり、九州電力の値より約 30% とかなり大きく、他のパラメータ値も同程度に大きな値になる: $D = 221.2\text{cm}$, $\Delta\sigma = 7.54\text{MPa}$, $A = 1.83 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}$, $M_{0a} = 1.81 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$, $D_a = 444.6\text{cm}$, $\Delta\sigma_a = 34.3\text{MPa}$, $M_{0b} = 2.28 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$, $D_b = 158.2\text{cm}$, $\sigma_b = 6.9\text{MP}$ 。つまり、このケースでは、断層モデルによる「地震規模の過小評価」と「応力降下量の過小設定」の両方の効果が現われ、地震動が一層過小評価されることになっている。ただし、松田式から M7.6 とした場合には、アスペリティの平均応力降下量が $\Delta\sigma_a = 34.3\text{MPa}$ と極めて大きく、M7 クラスの地震で見られる 20~30MPa より大きいため、断層長さや断層幅を微調整する「修正レシピ」を用いる必要があると考えられる。

表 12: 市来断層帯甕海峡中央区間の断層パラメータ

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	M_0 を九電の値とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	38.5km (M7.5 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	500.5 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ南下端 1 種類 + 断層南下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	2.67×10^{19} N·m	1.39×10^{19}	2.67×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.4, M_W 6.9	M7.2, M_W 6.7	M7.4, M_W 6.9		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	161.0 cm	84.2 cm	161.0 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa	3.03 MPa	5.80 MPa		
短周期レベル A	1.91×10^{19} N·m/s ²	1.28×10^{19}	1.58×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ全体	面積 S_a	182.57 km ² (0.365)	106.77 (0.213)	253.6 (0.507)	110.1(0.220)
	地震モーメント M_{0a}	1.95×10^{19} N·m	5.97×10^{18}	2.71×10^{19}	1.18×10^{19}
	平均すべり量 D_a	323.7 cm	169.2 cm	—	323.7
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	15.9 MPa	14.2 MPa	—	26.4
	短周期レベル A_a	1.87×10^{19} N·m/s ²	1.28×10^{19}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	7.11×10^{18} N·m	7.96×10^{18}	—	1.49×10^{19}
	面積 $S_b = S - S_a$	317.93 km ²	393.73 km ²	246.9	390.4
	平均すべり量 D_b	67.6cm	61.1 cm	—	115.1
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.7 MPa	—	5.0
	短周期レベル A_b	3.90×10^{18} N·m/s ²	—	—	—

*1:九州電力は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震 (気象庁発表 M6.4) の特性化震源モデルのパラメータを根拠に $\Delta\sigma = 5.8$ MPa, $\Delta\sigma_a = 15.9$ MPa と固定し, アスペリティ面積を $S_a = S(\Delta\sigma_a/\Delta\sigma)$ より求めている. そのため, アスペリティ面積は断層面積の 36.5% と異常に大きくなっている. これは鹿児島県北西部地震など M6 クラスの未飽和断層のデータを M7 クラスの飽和断層にそのまま適用した結果であり, 両者でスケール則が全く異なることを無視しており, 妥当とは言えない. 応力降下量を固定するため, 通常の断層モデルのレシピは使えない. そこで, 短周期レベルをアスペリティと背景領域に割り当てるものとし, アスペリティの短周期レベルを $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, 背景領域の短周期レベルを $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ で求め (通常の断層モデルでは解析上, $A_b = 0$ としている), 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より算出している. 地震モーメントも $M_o = (16/7)\Delta\sigma(S/\pi)^{3/2}$ より逆算しており, 通常の断層モデルより大きくなっている. また, 九州電力は, 背景領域にも短周期レベルを割り当てているため, アスペリティの応力降下量についても「実効応力」と呼んでいるが, 地震動解析上の差はない.

*2: 断層モデルのレシピに基づき, 地震モーメントを $M_0 = [S/(4.24 \times 10^{-11})]^2$, 短周期レベルを $A = 2.46 \times 10^{17}M_0^{1/3}$ より求め, 応力降下量を $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$, $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma(S_a/S)$ より算出している (この方法をここでは「A 法」と呼ぶ). これは九州電力が原子力規制委員会の求めに応じて算出した値だが, アスペリティの短周期レベルの値は全体の短周期レベルの値に等しい. にもかかわらず, 背景領域の短周期レベルの値として九州電力は 4.61×10^{18} N·m/s² と算出していた. 断層モデルでは通常, 短周期レベルをすべてアスペリティに割り当てるため, $A_b = 0$ となる. したがって, 九州電力の算出した A_b の値は通常の断層モデルでは無意味であり, 表中では, 「—」としている.

*3: 通常の断層モデルにおいて, 地震モーメント M_0 だけを上表の「九州電力」の欄の値に置き換えた場合のパラメータ値を求めている. 九州電力はこのうち短周期レベル A だけを求め, 応力降下量などは算出していない. 短周期レベルから応力降下量を求める注 2 の A 法では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 地震モーメントが計算上, 全体の地震モーメントを超えるため無意味になる. このような場合には, アスペリティ面積を断層面積の 22% に固定する方法がレシピで推奨されているため, アスペリティ面積を $S_a = 0.22S$ で求め, アスペリティの応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22$ で求めた. これをここでは「 $S_a/S = 0.22$ 法」と呼ぶ. ちなみに, 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M7.5 を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ で地震モーメント M_0 を求めると, $M_0 = 3.13 \times 10^{19}$ N·m となり, 九州電力の値より約 17% 大きく, 他のパラメータ値も同程度に大きくなる: $D = 188.7$ cm, $\Delta\sigma = 6.80$ MPa, $A = 1.67 \times 10^{19}$ N·m/s, $M_{0a} = 1.38 \times 10^{19}$ N·m, $D_a = 379.3$ cm, $\Delta\sigma_a = 30.9$ MPa, $M_{0b} = 1.74 \times 10^{19}$ N·m, $D_b = 134.9$ cm, $\sigma_b = 6.2$ MP

表 13: 市来断層帯甕海峡中央区間の断層パラメータ (応力降下量の不確かさを考慮した場合)

断層パラメータ	九州電力 *1	断層モデル *2	M_0 を九電の値とした場合 *3		
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	A 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	38.5km (M7.5 相当)				
断層幅 W	13 km				
断層面積 $S = LW$	500.5 km ²				
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km				
破壊開始点	アスペリティ南下端 1 種類 + 断層南下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	2.67×10^{19} N·m	1.39×10^{19}	2.67×10^{19} N·m		
マグニチュード	M7.4, M_W 6.9	M7.2, M_W 6.7	M7.4, M_W 6.9		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	161.0 cm	84.2 cm	161.0 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²		同左		
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s		同左		
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s		同左		
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa (8.7 MPa)	4.55 MPa	8.70 MPa		
短周期レベル A	2.38×10^{19} N·m/s ² (2.86×10^{19})	1.91×10^{19}	2.37×10^{19} N·m/s ²		
アスペリティ 全体	面積 S_a	182.57 km ² (0.365)	106.77 (0.213)	253.6 (0.507)	110.1(0.220)
	地震モーメント M_{0a}	1.95×10^{19} N·m	5.97×10^{18}	2.71×10^{19}	1.18×10^{19}
	平均すべり量 D_a	323.7 cm	169.2 cm	—	323.7
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	19.875 MPa (23.85 MPa)	21.3 MPa	—	39.5
	短周期レベル A_a	2.33×10^{19} N·m/s ² (2.80×10^{19})	1.91×10^{19}	—	—
背景領域	地震モーメント M_{0b}	7.11×10^{18} N·m	7.96×10^{18}	—	1.49×10^{19}
	面積 $S_b = S - S_a$	317.93 km ²	393.73 km ²	246.9	390.4
	平均すべり量 D_b	67.6cm	61.1 cm	—	115.1
	実効応力 σ_b	3.125 MPa (3.75 MPa)	4.0 MPa	—	7.5
	短周期レベル A_b	4.87×10^{18} N·m/s ² (5.85×10^{18})	—	—	—

*1: 「応力降下量の不確かさ」を考慮するため、通常は、断層モデルで求めた短周期レベルと応力降下量 (または実効応力) がすべて 1.5 倍になるよう波形合成の際に工夫する。たとえば、上表で九州電力の欄より右側の「断層モデル」や「 M_0 を九電の値とした場合」などでは、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、背景領域実効応力 σ_b および短周期レベル A, A_a, A_b の各値は表 9 の各値の 1.5 倍になっている。ところが、九州電力の欄では表 1 の各値の 1.25 倍にすぎず (1.5 倍の値を括弧内に示す)、しかも、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 5.8$ N·m は 1.25 倍の値 (7.25N·m) にもなっていない。その理由は、表 9 の九州電力の欄の短周期レベルを 1.5 倍すると 2.86×10^{19} N·m/s² になるが、「 M_0 を九電の値とした場合」の値は 2.37×10^{19} N·m/s² にすぎないので、これと同程度であればよく、1.25 倍に留めるといえるのである。これより、短周期レベルだけでなく応力降下量 (または実効応力) の値も 1.25 倍にすれば「1.5 倍」と同程度であるというのである。それなら、なぜ、応力降下量の値についても「 M_0 を九電の値とした場合」の 1.5 倍の値 (断層平均 8.7MPa とアスペリティ平均 39.5MPa) と同程度に引き上げようとならないのか、その理由を説明すべきであろう。また、九州電力は、1984 年九州西側海域の M5.5 の地震を断層モデルの要素地震として用いており、その応力降下量は 21.02MPa と大きい。「1.5 倍の応力降下量」がこれ以下の値でなぜ「応力降下量の不確かさ」を考慮したといえるのか、説明すべきであろう。

*2: 表 7 の「断層モデル」の欄の「短周期レベル A, A_a 」および「平均応力降下量 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ 」の値を 1.5 倍している。九州電力は、これらの値については甕断層帯甕区間についてのみ例示しており、市来断層帯については求めていない。

*3: 表 7 の「 M_0 を九電の値とした場合」の欄の「短周期レベル A 」および「平均応力降下量 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ 」の値を 1.5 倍している。九州電力は、これらについても甕断層帯甕区間についてのみ例示しており、市来断層帯については求めていない。