

甲第235号証

JNES/SSD08-009  
08 耐部報-0009

震源を特定せず策定する地震動の設定に係る検討  
に関する報告書

平成21年3月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

本報告書は、独立行政法人 原子力安全基盤機構が実施した業務の  
成果をとりまとめたものです。

本報告書の複製、転載、引用等には、当機構の承認が必要です。

平成 21 年 3 月

## 震源を特定せず策定する地震動の設定に係る検討

### 要 旨

原子力発電所の耐震設計審査指針が、原子力安全委員会において平成 18 年 9 月 19 日に改訂（新耐震指針）された。新耐震指針に基づく基準地震動  $S_s$  は、内陸地殻内地震や海溝型固有地震等を対象として「予め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」を考慮して策定することが規定されている。このうち、「震源を特定せず策定する地震動」は、旧指針の直下地震に代わるものとして導入され、活断層と直接関連付けできない過去の地震の観測記録に基づき策定することが規定されている。これに対応する地震動の策定方法の一つとしては、加藤ほか（2004）による応答スペクトル<sup>1)</sup>が提案されており、既設の発電所の耐震バックチェックに適用されているが、種々の課題が指摘されている。

さらに、2007 年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震・地震動の分析結果より、基準地震動を定義する基盤位置は、地震基盤とすべきと指摘されるようになった。この場合、新耐震指針の基準地震動  $S_s$  の定義位置である解放基盤表面の地震動や建屋への入力地震動を評価するためには、地震基盤からの地震動の地盤増幅率の合理的評価が必要となる。

そこで、本作業では、上記課題や 2007 年新潟中越沖地震で指摘された課題（解放基盤表面の定義や取り扱い）等を考慮し、震源を特定せず策定する地震動の設定手法の検討と、地盤増幅率の検討を行った。

震源を特定せず策定する地震動の設定手法の検討に先立ち、関係する既往研究の手法や課題等を整理した。既往研究としては、加藤ほか（2004）、JNES（2003, 2004）、及び 2007 年新潟県中越沖地震の観測地震動の分析を対象とした。

その結果、加藤ほか（2004）の課題としては、調査した震源を事前に特定できるとした地震の周辺活断層との関連付けの根拠が明確でないことや、対象とした地震及び震源近傍の地震動観測記録数が少なく、地震動の上限レベルの規定の根拠が明確でないこと等が挙げられた。

JNES（2003, 2004）では、確率論的地震ハザード評価手法に基づく地震動解析手法を用いて震源を特定し難い地震による地震動の超過確率別スペクトル評価の検討を実施しており、震源断層規模別に震源近傍

で発生する地震動を断層モデルで評価し、震源特性（アスペリティ深さ、応力降下量、高周波遮断特性）のばらつきや、断層の規模とアスペリティ深さによる地表地震断層の出現率、地震規模別発生頻度や断層の破壊形式（横ずれ、逆断層）等の地域性を考慮している。

震源を特定せず策定する地震動（水平動）は、基本的には地表・地形に明瞭な痕跡を残さないもの（グループ 1）と明瞭な痕跡と見なすか否かの判読が難しく、専門家の意見が分かれているもの等の地震（グループ 2）の観測地震動に基づき評価することとした。しかし、対象となる地震の観測地震動が僅かであることから、観測地震動を断層モデルによる解析結果で補完し、地震基盤上でプラント共通の地震動を設定するという基本方針を設定した。

断層モデルを用いて鉛直横ずれ断層（傾斜角  $90^\circ$ ）と逆断層（傾斜角  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ）による  $40\text{km} \times 80\text{km}$  の範囲の評価点の地震動を解析し、その応答スペクトルを統計処理した結果、加藤ほか（2004）による応答スペクトルは、断層からの最短距離が  $10\text{km}$  以内の応答スペクトルの対数平均  $+1.64\zeta$ （信頼度 84%）程度あるいは  $20\text{km}$  以内の応答スペクトルの対数平均  $+1.64\zeta$ （信頼度 95%）程度に対応し、JNES（2003, 2004）による超過確率別スペクトルの  $10^{-4}/\text{年}$  から  $10^{-5}/\text{年}$  の範囲にあることが分かった。また、断層モデルで解析した地震動が加藤ほか（2004）のスペクトルを超過しているときの解析条件を分析すると、アスペリティが浅く、応力降下量（ $\Delta\sigma$ ）と高周波遮断特性（ $f_{\text{max}}$ ）が高い（平均  $+\sigma$ ）等大きな地震動を発生させるケースに対応しており、震源特性の組合せとして発生する可能性が低い条件となっていることが分かった。

新潟県中越沖地震の柏崎刈羽発電所の知見に基づき、地震基盤のせん断波速度  $V_s$  が概ね  $2000\text{m/s}$  以上の KiK-net 観測点の観測記録を用い、地震基盤から工学基盤（ $V_s=400\text{m/s} \sim 1000\text{m/s}$ ）の地震動増幅率を検討した結果、地震動の増幅率は観測点によってばらつきがあるが、平均的には概ね周期  $0.5$  秒以下の短周期側で  $1.5$  倍程度、長周期側で  $1.0$  倍程度であることが分かった。

今後、さらに観測データ等を拡充して、震源を特定せず策定する地震動の合理的評価手法を構築する予定である。

## 震源を特定せず策定する地震動の設定に係る検討

### 目 次

1. 序論	1
1. 1 目的	1
1. 2 実施内容の概要	1
2. 震源を特定せず策定する地震動の設定方法の検討	3
2. 1 既往研究の手法の分析	3
2. 2 震源を特定せず策定する地震動の設定手法の検討	4
2. 3 断層モデルによる地震動解析結果による観測地震動の補完	4
2. 4 震源を特定せず策定する地震動レベルの設定方法の検討	5
3. 地震基盤から工学基盤の地震動増幅特性の概略検討	7
4. 結論	9
参考文献	参 1
付録	付 1

## 表一覧

表 1 震源を特定せず策定する地震動で対象とする地震の諸元	11
-------------------------------	----

## 図一覧

図 1 震源を特定せず策定する地震動の対象地震の考え方	13
図 2 震源を特定せず策定する地震動の設定フロー	13
図 3 観測記録の補完に用いた断層モデル及び地震動評価点	14
図 4 断層モデルのアスペリティ深さの設定例	15
図 5 断層モデルの解析結果による観測記録の補完の妥当性検証の方法	16
図 6 (a) 観測記録と断層モデル解析結果の比較例 (1984 年長野県西部地震・高根第一ダム)	17
図 6 (b) 観測記録と断層モデル解析結果の比較例 (2003 年宮城県北部の地震・KiK-net 河北)	18
図 7 「震源を特定せず策定する地震動」の設定の考え方	19
図 8 断層最短距離 20km 以内の観測記録及び断層モデルによる応答スペクトル及び統計量	20
図 9 断層モデルによる応答スペクトルの統計量・加藤ほか (2004) 応答スペクトル・ JNES (2003) 超過確率別スペクトルの比較	20
図 10 地震基盤から工学基盤の応答スペクトルの増幅率の検討例	21

## 1. 序論

### 1.1 目的

平成 18 年 9 月に改訂された原子力発電所の耐震設計審査指針（以後、「新耐震指針」という。）では、基準地震動  $S_s$  を「敷地ごとに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」の両者を考慮して策定することが規定されている。このうち、「震源を特定せず策定する地震動」については、既往研究による評価手法が存在するが、課題があるとされている。

そこで、本作業は、既往研究の課題あるいは成果を踏まえ、震源を特定せず策定する地震動の合理的な設定手法を検討することを目的として実施した。

一方、新耐震指針では、各プラントの基準地震動  $S_s$  は解放基盤位置で定義するとされている。しかし、新潟県中越沖地震の柏崎刈羽発電所の知見に基づくと、基準地震動  $S_s$  は地震基盤で設定の方が合理的との意見がだされるようになった。

そこで、本作業では、基準地震動  $S_s$  を地震基盤で設定する場合に必要となる、地震基盤から解放基盤までの増幅特性を評価手法の資料を得るために、地盤の増幅率を概略把握することを目的として実施した。

### 1.2 実施内容の概要

#### (1) 震源を特定せず策定する地震動の設定方法の検討

##### 1) 既往研究の手法の分析

既往の研究（加藤ほか（2004））の震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトル作成の考え方と手法の課題を整理した。

##### 2) 震源を特定せず策定する地震動の設定手法の検討

既往の研究（加藤ほか（2004）、JNES の既往検討、JNES の新潟県中越沖地震の分析検討）の評価手法における課題やこれまでの検討状況を踏まえて、震源を特定せず策定する地震動の設定手法をまとめた。

##### 3) 断層モデルによる地震動解析結果による観測地震動の補完

新耐震指針では震源を特定せず策定する地震動は観測記録に基づき評価すると規定されている。しかし、観測記録が不足するため、それを補うために断層モデルにより種々の条件を設定して震源近傍の地震基盤位置の地震動を解析した。

##### 4) 震源を特定せず策定する地震動レベルの設定方法の検討

地震動レベル設定の考え方を構築した上で、地震基盤における「震源を特定せず策定する地震動」の地震動レベルを検討した。また、JNES の既往検討の成果である震源を特定しにくい地震による地震動の超過確率別スペクトルと比較して、震源を特定せず策定する地震動レベルの超過確率を評価した。

(2) 地震基盤から工学基盤の地震動増幅特性の概略検討

新潟県中越沖地震の際の柏崎刈羽発電所での観測地震動の分析結果の知見に基づき、各プラント共通の地震動レベルを地震基盤で設定し、設計に用いる解放基盤位置の地震動は各プラントで地震基盤から解放基盤までの増幅特性を評価して設定することを想定し、地震基盤から解放基盤までの地震動の概略の増幅率を KIK-net 観測地点の地盤条件と観測地震動を用いて検討した。



## 2. 震源を特定せず策定する地震動の設定方法の検討

既往研究の手法を分析し、震源を特定せず策定する地震動の設定手法を構築した。さらに、観測記録の不足を補うために、断層モデルによる地震動解析結果による観測地震動の補完を行い、震源を特定せず策定する地震動レベルを検討した。

### 2.1 既往研究の手法の分析

震源を特定せず策定する地震動の評価手法としては、加藤ほか(2004)がある。また、JNES(2003, 2004)では、震源を特定し難い地震の超過確率別スペクトルを検討している。

加藤ほか(2004)では、以下の考え方で応答スペクトルを作成している。

- (1) 内陸地殻内地震を対象として既存の活断層図や文献調査、空中写真判読、地質調査等によって、震源を事前に特定できない地震を調査し、震源近傍(20km以内)の硬質岩盤上の地震動観測記録を用いて地震動を設定している。
- (2) 上記の条件を満足する国内の観測記録は、1994年鹿児島県北西部の地震の本震及び最大余震によるもので、1989年長野県西部地震については、やや遠方の観測記録に対し距離補正を行い、長周期側の地震動レベルの設定に用いている。
- (3) さらに、地震観測記録を補うために、米国の地震観測記録を用いることとし、その際、地表地震断層が出現した地震も、地震規模のスケーリングの観点から、地表地震断層が出現しない可能性があるものは含めている。
- (4) 上記の地震観測記録(9地震、12地点、30水平成分)の解放基盤に相当する岩盤上の応答スペクトルの上限レベルとして、最大加速度値450Gal、最大加速度応答値1200Gal、最大速度応答値100cm/sが設定されている。

加藤ほか(2004)の手法の主な課題として、調査した震源を事前に特定できるとした地震の周辺活断層との関連付けの根拠が明確でない、対象とした地震及び震源近傍の地震動観測記録数が少なく、地震動の上限レベルの規定の根拠が明確でない等が上げられる。さらに、論文で取り扱われている地震以降に発生した地震に対する分析や検討も必要とされている。

一方、JNES(2003, 2004)では、平成13年より、確率論的地震ハザード評価手法に基づく地震動解析手法を用いた震源を特定しにくい地震による地震動の超過確率別スペクトルを検討<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>し、原子力安全委員会の耐震指針検討分科会等に報告した。この手法では、震源断層規模別に震源近傍で発生する地震動を断層モデルで評価する際に、震源特性(アスペリティ深さ、応力降下量、高周波遮断特性)のばらつきや、断層の規模とアスペリティ深さによる地表地震断層の出現率、地震規模別発生頻度や断層の破壊形式(横

ずれ、逆断層)等の地域性が考慮されている(詳細は2.3節に示す)。新指針では、基準地震動  $S_s$  は決定的に設定し、超過確率は参照との位置づけとなっているため、上記手法による超過確率別スペクトルを  $S_s$  として直接用いることはできないが、地震動レベルの妥当性の確認には有効である。また、潜在断層に対する断層モデルの設定の考え方や、不確実さを考慮して断層モデルで解析した非常に多くの震源近傍の地震動データは、「震源を特定せず策定する地震動」のレベルを検討する際の観測記録の補完に有用である。

## 2.2 震源を特定せず策定する地震動の設定手法の検討

2.1節で示した評価手法における課題やこれまでの検討状況を踏まえて、以下に示す方針で震源を特定せず策定する地震動の設定手法を検討することとした。

- (1) ここで検討する地震動は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価で、詳細な調査を実施しても発見が困難な震源(活断層)を対象とし、全プラント共通に設定するミニマムリクワイアメント(最低限の要求)のものとする。
- (2) 対象地震は、基本的に震源を事前に特定できない地震(図1のグループ1の地震)と、明瞭な痕跡と見なすかどうか判読が難しく、意見が分かれているものとするが、対象となる過去の地震が少ないため、地震規模のスケールリングの観点から地表地震断層が発生しない可能性がある地震(図1のグループ2の地震)も考慮する。
- (3) 対象地震の観測記録が少ない点を補うために、JNESによる超過確率別スペクトルの評価手法を参考に、断層モデルによる震源近傍の地震動解析結果を地震動観測記録と併せて用いる。
- (4) 各プラントで共通に用いる地震動を地震基盤で設定し、解放基盤位置や建屋基礎下の入力地震動は、各プラントの地震基盤から各地盤までの増幅特性を評価して個別に設定する。
- (5) その他、断層破壊形式、地震発生層の厚さ、物理探査等の詳細調査で検知可能な最大地震の規模等各プラントの地域性や調査状況による違いを考慮する。

上記の方針に基づいて検討した、「震源を特定せず策定する地震動の設定フロー」を図2に示す。ここでは、対象となる地震の観測記録を2.3節で示す断層モデルによる解析結果で補完し、地震基盤上でプラント共通の地震動を設定する。さらに、各プラントで深部及び浅部の地盤構造を考慮し、地震基盤の地震動から解放基盤、建屋基礎下の入力地震動を設定することとした。

## 2.3 断層モデルによる地震動解析結果による観測地震動の補完

観測記録を補う方法として、震源を特定しにくい地震(潜在断層)に対して震源断層を想定し、断層モデルにより震源近傍の地震基盤位置の地震動を解析した。図1のグループの定義に従い選定した評価対象地震を表1に示す。地震を想定した震源断層モデル及び解析条件、地震動評価点を図3に示す。震源断層モデルは、横ずれ断層と逆断層について、地表地震断層が出現するか否かの境界と考えられる地震規模(横

ずれ M6.5~M7.3、縦ずれ M6.5~M6.8) を想定し、強震動予測レシピア<sup>4)</sup>等を参考に、アスペリティ深さ(浅い、中間、深い、図4参照)、応力降下量及び高周波遮断特性(平均及び平均± $\sigma$ )等震源パラメータの不確かさを考慮して設定した。その際、横ずれ断層では、香川(2005)の方法による地表地震断層が出現する表層変位とアスペリティ深さの関係<sup>5)</sup>と、武村(1998)の地震規模と地表地震断層の出現率の関係<sup>6)</sup>を参考に、M6.8ではアスペリティ深さを5km以上に、M7以上では断層下端に設定した。逆断層については、断層変位に伴う撓曲や褶曲により地震断層が現れる表層変位にばらつきが大きいことから、アスペリティが浅いケースを断層上端に設定した。

上記の断層モデルによる解析結果を観測記録の補完に用いることに対する妥当性を確認するために、各対象地震と震源断層の規模や震源特性がほぼ同じ条件で、断層から観測点までの最短距離とほぼ同じ距離にある断層周辺の評価点の解析結果と観測記録を比較した(図5参照)。応力効果量や高周波遮断特性等震源特性の詳細が不明な場合は、それらの不確かさを考慮したケース(平均及び平均± $\sigma$ )を加えて比較した。

代表的な対象地震の観測記録と断層モデルを用いたシミュレーション解析結果とを比較した結果を図6に示す。同図には震源の諸元も併せて示す。断層モデルによる解析結果は、観測記録を概ね包含しており、断層モデルにより補完が可能であることを確認した。

なお、グループ1とグループ2の地震の観測地震動と断層モデルを用いたシミュレーション解析結果の比較を付録にまとめて示す。

#### 2.4 震源を特定せず策定する地震動レベルの設定方法の検討

地震基盤における「震源を特定せず策定する地震動」のレベル設定の考え方を図7に示す。同図に示すように、地震動レベルは、対象とする敷地周辺の地質条件や活断層の調査状況を考慮して震源断層からの敷地までの最短距離を想定し、最短距離以内にある地震動観測記録や断層モデルによる評価点の解析結果の応答スペクトルを重ね書きし、平均的なスペクトルや信頼度別のスペクトルを統計処理した結果に基づき設定する。その際、設定した地震動を超過する地震動の発生確率をJNESによる超過確率別スペクトル(例えば目安値 $10^{-4}$ 程度)と比較するとともに、超過する地震動を発生させている震源断層の条件を検討して、地震動レベルの妥当性を判断する。ミニマムリクワイアメントとしての位置付けから、地震動を最大包絡する考え方は採らない。

震源を特定せず策定する地震動(水平動)のレベル設定の試検討として、最短距離が10km以下及び20km以下の観測点及び評価点の応答スペクトルの重ね書き及び統計処理結果、加藤ほか(2004)による応答スペクトル及びJNESによる超過確率別スペクトルを比較検討した。それらの結果を図8及び図9に示す。加藤ほか(2004)による応答スペクトルは、Noda et al(2002)による地震動増幅特性を用いて、工学基盤から地震基盤のスペクトルに変換して比較した。加藤ほか(2004)による応答スペクトルは、断層からの

最短距離が 10km 以内の応答スペクトルの対数平均+ $\zeta$  (信頼度 84%) 程度、20km 以内の応答スペクトルの対数平均+1.64 $\zeta$  (信頼度 95%) 程度に対応し、JNES による超過確率別スペクトルの  $10^{-4}$  から  $10^{-5}$  の範囲にある。また、断層モデルの解析結果について、加藤ほか (2004) のスペクトルを超過している地震動の解析条件を分析すると、アスペリティが浅く、応力降下量 ( $\sigma$ ) と高周波遮断特性 ( $f_{max}$ ) が高い (平均+ $\sigma$ ) 等大きな地震動を発生させるケースに対応しており、震源特性の組合せとして発生する可能性が低い条件となっている。

### 3. 地震基盤から工学基盤の地震動増幅特性の概略検討

新耐震指針においては、基準地震動は、 $V_s=700\text{m/s}$  以上の解放基盤位置で設定するよう規定されている。

一方、2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震・地震動の分析結果より、当該発電所で基準地震動を設定する解放基盤表面 ( $V_s=700\text{m/s}$ ) では、Mj6.8の地震規模で通常想定される地震動を大幅に上回る地震動が発生した。さらに、1.5km程度の距離にある1号機(約1700Gal)側と5号機(約770Gal)側で地震動の大きさに2倍程度の差があったことが明らかとなった。解放基盤で大きな地震動が発生した要因として、震源特性と褶曲した厚い堆積層の影響が指摘されており、原子力・安全保安院の耐震・構造設計小委員会等で、基準地震動を定義する基盤位置に対して、地震基盤とすべき等再検討の必要性が指摘されている。

そこで、ここでは地震基盤で各プラント共通の地震動レベルを設定し、設計に用いる解放基盤位置の地震動は各プラントの地震基盤から解放基盤までの増幅特性を評価して設定することを想定して、地震基盤から解放基盤までの地震動の増幅率がどの程度かを検討した。

そこで、地震基盤から解放基盤までの地震動の増幅率がおおよその程度かを把握するために、基盤の  $V_s$  が概ね  $2000\text{m/s}$  以上の KiK-net 観測点の観測記録と地盤データを用いてはざと解析を行い、地震基盤から工学基盤 ( $V_s=400\text{m/s} \sim 1000\text{m/s}$ ) の地震動増幅率を検討した。評価に用いた観測地震及び観測点及び評価結果を図10に示す。地震動の増幅率は観測点によってばらつきがあるが、平均的には概ね周期0.5秒以下の短周期側で1.5倍程度、長周期側で1.0倍程度であった。

#### 4. 結論

新耐震指針に基づき評価する震源をせず策定する地震動の設定方法について検討した。対象とする地震の選定、観測記録に対する断層モデルによる補完の考え方と検討例、地震基盤面における地震動レベルの設定の考え方と目安値を把握した。また、プラント共通で設定する地震動を地震基盤で設定した場合、解放基盤で概ねどの程度増幅するかを検討するために、KiK-net 観測点の地盤モデルと観測記録を用いて、地震基盤から工学基盤面までの応答スペクトルの増幅特性を検討した。

今後は、上記手法に対し、地震発生層の厚さや物理探査による断層検知精度等地域性を考慮した地震規模上限レベルの設定、潜在断層に対する震源特性のより詳細なパターン化と地震動評価、地震基盤から工学基盤面までの地震動増幅特性の評価等、より詳細な検討を行い、震源を特性せず策定する地震動の具体的な設定手法とレベルを提案する計画である。

表1 震源を特定せず策定する地震動で対象とする地震の諸元

グループ1(図1参照)  
 グループ2

観測地震	Year	グループ	種別	M <sub>J</sub>	Depth(km) ※1 JMA ※2 F-net	観測点	対象Vs (km/s)	Xsh (km)
長野県西部地震	1984	1	横ずれ	6.8	2 ※1	高根第一ダム	-	23.6
						奈川渡ダム	-	32.9
鹿児島県北西部地震 (本震)	1997	1	横ずれ	6.6	8 ※2	鶴田ダム	-	4.6
鹿児島県北西部地震 (余震)	1997	1	横ずれ	6.4	11 ※2	鶴田ダム	-	9.1
宮城県北部の地震	2003	1	縦ずれ 逆断層	6.4	5 ※2	MYGH01(仙台)	3.30	21.7
						MYGH11(河北)	2.66	9.1
鳥取県西部地震	2000	2	横ずれ	7.3	11 ※2	SMNH01(伯太)	2.70	6.1
						TTRH02(日野)	1.50	2.6
						賀祥ダム	-	2.4
新潟県中越地震 (本震)	2004	2	縦ずれ 逆断層	6.8	5 ※2	NIGH11(川西)	0.85	8.9
新潟県中越地震 (最大余震)	2004	2	縦ずれ 逆断層	6.5	11 ※2	NIGH12(湯之谷)	0.73	9.5
						NIGH11(川西)	0.85	11.1
福岡県西方沖地震	2005	2	横ずれ	7.0	5 ※2	FKOH03(宇美)	3.10	27.5
						SAGH04(東背振)	2.90	36.7

【観測地震の震源位置】

