

原子力発電所の耐震設計のための基準地震動

入倉孝次郎

愛知工業大学

1. はじめに

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」は4年に及ぶ議論を経て昨年9月19日に改訂された。今回の原子力発電所の耐震設計審査指針改訂における重要ポイントの1つは、耐震設計の前提となる基準地震動をどのように決めるかにあった。改訂が必要となった背景には、地震学などにおける新知見の蓄積や原子力発電所の耐震設計技術の進歩があるが、やはり、1995年に発生した兵庫県南部地震の経験が契機となっている。この地震で得られた強震動を含む種々の記録に基づいて、断層の活動様式、震源破壊過程と地震動特性、構造物の耐震性等にかかる貴重な知見が得られた。改訂理由の1つは、これらの最新の重要な知見を耐震安全性に対する信頼性向上に反映させることにある。もう1つは、国際的に原子力安全耐震設計に対し確率論的安全評価を取り入れるという動きがあり、この考え方を日本でも入れるべきとの意見が原子力のリスク研究者から出されていた。

原子力発電所の耐震設計審査指針の基準地震動の基本的な考え方は「地震学および地震工学的見地から見て、施設の寿命中に極めてまれではあるが発生する可能性のある限界的地震動を基準地震動として最新の知見により策定し、そのような地震動に対して、発電用原子炉施設を、安全防護施設を含めて必要な安全機能が損なわれず周辺の公衆に過度の放射線災害を与えないように設計する」ことにある。これは原子力発電所のように万一事故が起こったら広域に極めて重大な被害の発生が予想される施設に対しては当然のことで、旧指針においても同様の考えに基づいて耐震設計の方針が規定されていた。今回の指針の改訂でこれまでに比べて基準地震動の策定方法が大幅に高度化されるだけでなく、「この基準地震動は、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されなければならない」ことが明記された。これに加えて、「このような限界的地震動に対する安全性を達成しても、なおかつ地震によるリスクは残存する可能性があることを踏まえ、この『残余のリスク（注1）』を考慮して、公衆放射線災害のリスクを評価し、それを合理的に実行可能な限り小さくすることに努力が払われるべきこと」も記されている。

2. 基準地震動にかかわる主な改訂点

旧指針では、「基本方針」として「発電用原子炉施設は、想定されるいかなる地震力に対しても、大きな事故とならない、誘因とならないような十分な耐震性を有していなければならない」と定められていた。ここでの「いかなる地震力」とは、耐震設計のための基準地震動は想定しうる最大限の地震動として与えることを前提としている、と考えられる。

新指針の「基本方針」では、地震動および地震力に関する定義を厳密化し、「施設の供用期間中にごくまれではあるが発生する地震動、基準地震動による地震力に対して、その安全性能が損なわれない設計をする」と規定された。これが基準地震動 S_s を決める根拠となる。また、解説において以下のように記述されている。地震動の策定については、『施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動』を適切に策定し、この地震動を前提とした耐震設計を行うことにより、地震に起因する外乱によって周辺公衆に対し、著しい放射線被爆のリスクを与えないようにすることを基本とするべきである」としている。さらに、「残余のリスク」の存在について、「地震学的見地からは、上記のように策定された地震動を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できない。このことは、耐震設計用の地震動策定において、『残余のリスク』が存在することを意味する」と記されている。

上のように「残余のリスク」が存在することは明記されたが、その評価方法および適用については、「安全目標が決められていない段階で、残余のリスクについて具体的数値は決められないため、合理的に可能な限り小さくするための努力を払うべきである」と規定されている。なお、この問題については、分科会の見解という形で、安全審査とは別に、運転開始までに確率論的安全評価を試行的に実施、確認することとし、学問の進歩や国民的コンセンサスの状況を踏まえて改訂ができるよう、実際に残余のリスクを必ず評価してデータの蓄積を図ることとしている。

基準地震動の策定について、旧指針ではその強さの程度に応じ2種類の地震動 S_1 と S_2 を選定し、 S_1 をも

たらず地震（設計用最強地震）と S2 をもたらす地震（設計用限界地震）が過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造などにより規定されていた。今回の改訂の審議で、基準地震動は最近の地震学および地震工学における蓄積を踏まえ、旧指針における S1 および S2 の策定方針を統合し高度化して、科学的見地から限界地震動を決めるべきということで、Ss に統一した。設計用に必要なものとして地震工学的に定義される Sd が規定されることになった。また、これまで水平方向のみ決め、鉛直方向は静的地震力として水平方向の 2 分の 1 と仮定していたものを、検討対象とする地震とそのサイトの性質に応じて、水平方向に加え、鉛直方向についても策定するとした。これまでの応答スペクトルに加えて、断層モデルを用いた手法も採用するとともに、地震動評価に関係する不確実さについてもばらつきを考慮することが明記された。

検討対象とする活断層について、耐震設計の安全性を高めるため調査期間を 5 万年から後期更新世以降に拡大した。また活断層の調査方法について、敷地からの距離に応じて、地形学・地質学・地球物理学的手法等を総合した十分な調査を義務付けている。旧指針では、敷地又はその近傍で活断層が認められない場合においても M6.5 の直下地震による地震動を考慮すると規定されていたが、改訂指針では、詳細な調査をもとに敷地ごとに震源を特定するように最大限の努力をするが、なお見逃される可能性もあるので、「震源を特定せず策定する地震動」として、一定レベルの地震動を別途設定することになった。

3. 基準地震動の策定

改訂指針において、基準地震動は、地震学および地震工学の最新の知見を踏まえ、かつ従来の指針と継続性がある形で、策定することが規定された。基準地震動 Ss は、施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の前提となる地震動で、その策定に当たっては、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されねばならないことも定められた。改訂の重要点の 1 つは、基準地震動の Ss を決めるために、必ず敷地ごとに、最も大きな影響を与える可能性のある地震について、地震活動・震源の性質、および伝播経路・サイト特性を十分調査することにある。これらの調査に基づき、基準地震動 Ss は「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について策定する。

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は以下のような手順で策定される。はじめに、敷地に影響を及ぼす地震について、「内陸地殻内地震」、「プレート間地震」、「海洋プレート内地震」という地震発生様式等に着目した分類により、それぞれについて地質・地形学および地球物理学的調査を行い、敷地に影響の大きい地震がどれかを検討する。「内陸地殻内地震」のため評価すべき活断層は後期更新世以降に活動が否定できないものとする。「プレート間地震」や「海洋プレート内地震」は、過去の地震の発生状況を精査し、敷地周辺の中・小・微小地震の活動、応力場、地震発生様式当に関する既往の研究成果を総合的に検討して選定される。このような調査に基づき、検討用地震を設定し、それぞれの検討用地震ごとに、「応答スペクトルに基づいた地震動評価」および「断層モデルに基づいた地震動評価」の双方を実施する。

応答スペクトルに基づく地震動評価に関しては、従来から活断層のマグニチュードと距離減衰式から大崎スペクトルを決めて、経験的な包絡関数からスペクトルを決めるという方法で基準地震動の策定がなされてきた。改訂指針でも、これまでの基準地震動策定の経験を生かして、同様の手法で基準地震動を策定する。設計用の応答スペクトルの形状は大崎スペクトル策定以後蓄積された強震動データを用いて求めなおして用いることが前提となる^{(1),(2),(3)}。最近の各地で得られた強震動データから、応答スペクトルの経験的關係式は内陸地殻内地震やプレート間地震など地震発生様式の違い、震源域や伝播経路などの地域特性、により異なることがわかってきた^{(4),(5)}。敷地ごとに応答スペクトルの適用に当たって上記のことを考慮することが必要となる。

断層モデルを用いた手法による地震動評価に関して、最近、地震調査委員会は標準的な評価法として「強震動予測レシピ」を推奨している^{(6),(7)}。この方法は、断層面積や地震規模のような震源の全体像を表す「巨視的断層パラメーター」と、震源断層の中の不均質性を表すアスペリティの面積やそでの応力降下量などの「微視的断層パラメーター」の両方を考慮して、強震動を算出する。これらの「巨視的断層パラメーター」と「微視的断層パラメーター」は地震モーメントを関数として経験的に得られた 2 つの異なるスケールング則により推定される⁽⁸⁾（図 1 参照）。

内陸地殻内地震でもプレート境界や海洋プレート内に起こる海溝型地震でも、種々の調査データから震源域の大きさやアスペリティの情報が得られると、レシピに基づいて震源断層がモデル化され、強震動波形

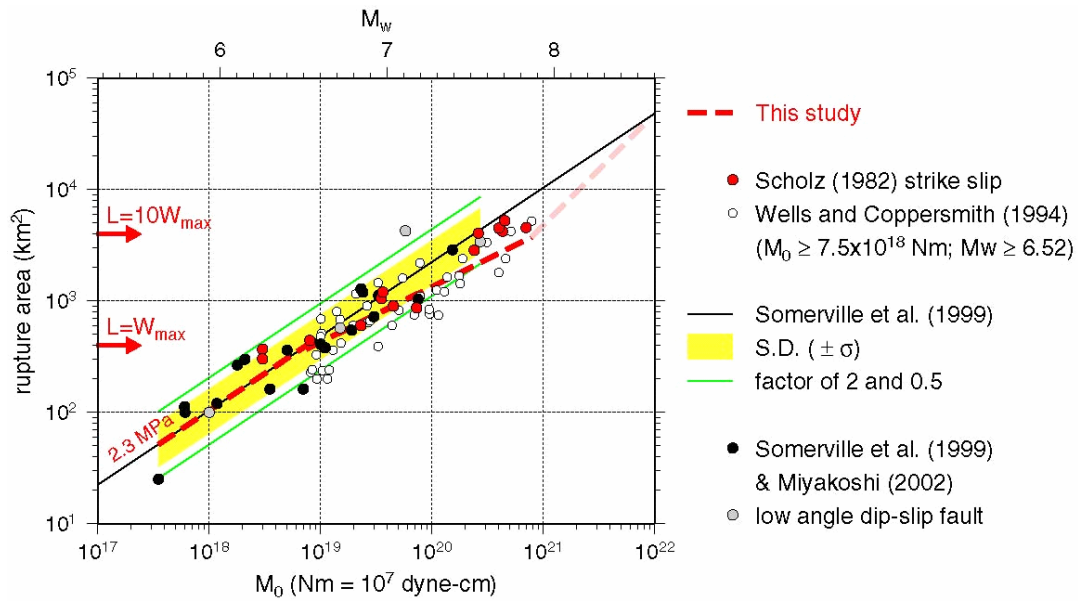


図1. 地震モーメントと断層面積のスケーリング則。赤破線は3段階のスケーリングを示す。最初の折れ曲がり、 M_0 が 7.5×10^{18} Nm、 M_w が 6.52。(入倉, 2004) ⁽⁶⁾より引用。

の計算ができる。また、波形が得られれば応答スペクトル、最大加速度、最大速度などの情報も同時に得ることもできる。とくに、敷地が震源断層に近い場合には断層モデルを用いた方法を重視することが決められている。これは、震源近傍域では震源断層とサイトの幾何学的位置関係により強震動の波形が大きく影響を受けるからである。強震動の破壊力を評価する上で、波形の位相特性が非常に重要になる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

原子力施設の耐震安全性を確保するために、敷地ごとに十分な調査をし、震源を特定して地震の震源断層のモデル化を行って基準地震動を決めるということは世界に誇る最新の考え方である。これが今回の改訂の重要点の1つで、国際的にも日本がはじめてである。

震源を特定せず策定する地震動

今回の改訂では、基準地震動 S_s は、詳細な活断層や海溝域の調査により敷地ごとに検討用地震を選定し、「震源を特定して策定する地震動」として与えられることを基本としているが、調査を行っても特定できない地震の存在も知られている。旧指針では、規模の小さい地震は見逃す可能性があるとして、すべての敷地でマグニチュード 6.5 の「直下地震」が震源距離 10 km に起こることを想定して、設計用限界地震の1つとして地震動の評価を行っていた。今回の耐震指針検討分科会の審議では、近年起こった地震と活断層の関係の調査研究により、マグニチュード 6.5 以上の活断層地震は震源が特定できるとは言い切れないことが指摘さ

れた。

活断層のないところに地震が発生した場合、①調査が十分に行われてなかったために活断層の存在がわからなかっただけで、詳細な調査を実施すれば活断層の評価は可能であった、あるいは②事前に詳細な調査を行っても活断層の存在は特定できなかった、という2つのケースが考えられる。これまでの研究成果から、一般的には、一定規模以上の地震が発生したとき、地震に伴い地表断層が出現し、地震の痕跡が変動地形や地下構造に累積されるが、規模の小さい地震では地表断層が出現しないので、明瞭な断層地形は形成されない、ことはわかってきた。このような関係は「地震規模と地震断層の面積の関係」や「地震規模と震源断層の長さの関係」など断層パラメータに関するスケーリングに顕著な折れ曲がりが見られることから明らかにってきた(図1および図2上図参照)。しかしながら、最近の地震、例えば兵庫県南部地震など、の震源過程の研究などから、アスペリティが浅い時には地表断層が出現するが、アスペリティが深いと地表断層が出現しない⁽¹¹⁾、こともわかってきた。このようなアスペリティ・モデルの考えから、活断層を事前に特定できるかどうかを地震規模のみで規定するのは問題があることが分科会で指摘された。地震動の観点からは、震源が直下にあるとき、アスペリティが浅いと敷地へ影響の大きい揺れが生じるが、アスペリティが深いと敷地への影響は相対的に小さくなる。

そこで、改訂指針では、旧指針のようにM6.5の「直

下地震」というような一定規模の「地震」を規定するのではなく、地震動のレベルから「震源を特定せず策定する地震動」を基準地震動の1つとして別途に算定することとした。具体的には、震源と活断層を関連付けることが困難な内陸地殻内地震について、国内外の幅広い知見の収集、検討を行い、そのような地震の過去の観測記録を収集し、これらを基に敷地の地盤物性を加味した応答スペクトルを設定し、これに地震動特性を適切に考慮して地震動評価を行うこととした⁽¹²⁾。ただし、この考え方を具現化して策定された基準地震動の妥当性については、申請時点における最新の知見に照らして個別に確認する必要があることも規定されている。

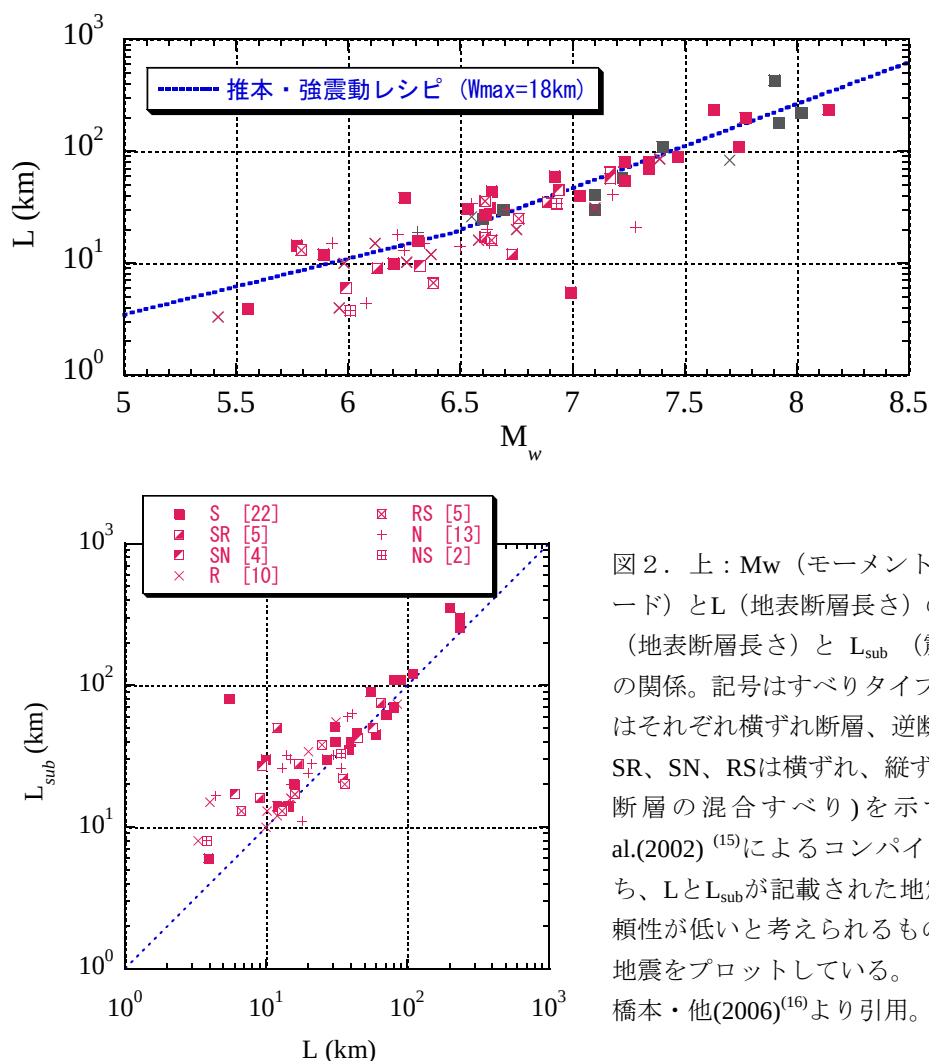
その他考慮すべき問題点—その1：孤立した長さが短い活断層—

先に述べた巨視的断層パラメータのスケーリング則から、一定規模以上の内陸地殻内地震は、多くの場合地表断層が出現し⁽¹³⁾、地表断層の長さ L と震源断層の長さ L_{sub} がほぼ一致する⁽¹⁴⁾。したがって、地表に現れている活断層の長さから将来起こる地震の規模が推定できると考えられている。

ところが、地形・地質調査などから孤立した長さの短い活断層の存在も知られている。たとえ短くてもそのような活断層は過去の地震活動の痕跡を示すもので、将来地震の源となる可能性が高いと考えられ、当然「震源を特定して策定する地震動」として評価対象とするべきである。ただし、地表に現れている活断層の長さから「断層長さと地震規模」のスケーリング則などにより地震規模を推定するのは問題がある。

これまでの内陸で活断層に関して発生した地震に関して、地表地震断層の長さ L と地震規模や震源断層の長さ L_{sub} の関係がStirling et al. (2002)⁽¹⁵⁾によりコンパイルされている。それらのデータの中には、信頼性に欠けるものや明らかな誤りなどが含まれているので、慎重にデータの選別を行い、信頼性のあるデータのみ用いて地震モーメント (M_w) と地表断層長さ (L) の関係(図2上参照)、および地表断層長さ (L) と震源断層長さ (L_{sub}) の関係(図2下参照)をプロットしている。

図2. 上： M_w （モーメント・マグニチュード）と L （地表断層長さ）の関係。下： L （地表断層長さ）と L_{sub} （震源断層長さ）の関係。記号はすべりタイプ別（S、R、Nはそれぞれ横ずれ断層、逆断層、正断層；SR、SN、RSは横ずれ、縦ずれ、および正断層の混合すべり）を示す。Stirling et al.(2002)⁽¹⁵⁾によるコンパイルデータのうち、 L と L_{sub} が記載された地震で、 M_w の信頼性が低いと考えられるものを除いた61地震をプロットしている。橋本・他(2006)⁽¹⁶⁾より引用。



(L_{sub})の関係が橋本等により作成された(図2下図参照)⁽¹⁶⁾。

図2の上図は観測データから得られる M_w と L の関係は、断層幅 W_{max} が18 kmで飽和すると考えると、よく説明できることを示している。そのとき、 L が約20 kmで M_w がほぼ6.5を境として M_w と L のスケール則が変化していることがわかる。また、図2の下図から、 L が20 kmよりも大きい地震では L と L_{sub} は比較的良好に対応するが、 L が20 kmよりも小さくなると、両者は顕著にずれている。 L が小さくなっても L_{sub} は約20 km付近に漸近し、それ以上小さくならない。これらの関係から、地表に数km程度の長さの孤立した活断層がある場合、地震学的に考えると地下には最低20 kmくらいの断層が存在する可能性が否定できない。ただし、ここでの震源断層の長さ(L_{sub})は必ずしも精度良いものではなく目安値として考えるべきものである。

孤立した短い活断層の震源断層を想定するために、図1に示されるような震源断層の面積と地震モーメントに関するスケール則にしたがって、地表断層が現れる可能性が高い一定規模以上の地震(たとえば、 $M_0 > 7.5 \cdot 10^{18} \text{ Nm}$ 、 $M_w \sim 6.5$)とするなど最新の知見の整理が必要と考える。

その他考慮すべき問題点—その2：ばらつきの評価—

検討用地震を選定して、地震規模、震源断層、アスペリティなど震源断層パラメーターを推定し、基準地震動 S_s を策定するときに、種々の不確かさ(ばらつき)が存在する。この不確かさは基準地震動を過小あるいは過大な評価をもたらす可能性がある。

改訂指針では、本文で「基準地震動 S_s の策定過程に伴う不確かさ(ばらつき)については、適切な手法を用いて考慮することとする」と明記し、解説においても「基準地震動 S_s の策定過程に伴う不確かさ(ばらつき)」の考慮に当たっては、基準地震動 S_s の策定に及ぼす影響が大きいと考えられる不確かさ(ばらつき)の要因及びその大きさの程度を十分踏まえつつ、適切な手法を用いることとする、と記されている。これは、断層パラメーターの不確かさ等により、基準地震動が過小評価にならないように歯止めとして規定された。

地形・地質調査などにより、震源断層が推定されたとき、算定される地震動が過小評価にならないような検討が必要である。活断層や地震活動の調査等で標準的な震源断層モデルが設定できたとき、ここの断層パラメーターの不確かさを考慮して敷地に影響の大きい震源断層モデルの想定して地震動の範囲を評価する必

要がある。

4. おわりに

耐震指針検討分科会は、4年10ヶ月にわたる審議の結果、改訂指針(案)を平成18年4月28日に全会一致でとりまとめた。それを受けて原子力安全基準・指針専門部会で審議を行い、一部修正の上了承された。原子力安全委員会は、指針(案)の内容を妥当と認め、行政手続法第39条の規定に基づき意見公募を行った。意見提出期間は30日間で短いものだったが、世論の関心の高さを反映して、680件のコメントが出された。特に、基準地震動については、4年間にわたる議論の中で意見相違の大きかったところであり、賛否を含む多様な意見が出された。

提出意見の中に、2006年6月に島根原子力発電所のサイト近傍のトレンチ調査で活断層の存在が明らかになったのは、指針で規定されている活断層の調査法に問題があるのではないかの指摘があった。この問題は分科会における指針案のとりまとめの後に明らかになったもので、「安全審査」は信頼性があることを前提とした指針作りそのものに問題があるのではないかと、また原子力発電所にかかわるこれまでの活断層調査が、変動地形学を中核とする現在の活断層研究が十分に反映されたものになっていない、などの意見が出された。

これらの提出意見について審議の結果、指針に規定されている活断層調査に関する項目について、変動地形学的な研究者の指摘する変動地形学的調査を明示的に入れるよう修正された。安全審査の信頼性に関しては、今回の改訂指針は敷地からの距離に応じて詳細な活断層調査を規定しており、これまで以上に信頼性ある調査が行われることになる、との意見が多数を占めた。個人的意見としては、この問題に関して、今後安全審査において活断層の見落としなどがおこることないように適切な専門家を委員とするなど適切な対応を関係機関に強く要望したい。

震源を特定せず策定する地震動の策定方針については、分科会においても意見が分かれたこともあり意見公募でも多くの意見が出された。この問題については、これまでの分科会での議論のまとめとして、指針の解説で敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しようとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず、全ての申請において共通的に考慮すべき地震動」と規定されている。すなわち、「震源を特定せず策定する地震動」は詳細な地形・地質調査の

結果、敷地周辺に活断層が確認されない場合でも、基準地震動として想定すべき minimum requirement を意味している。孤立した短い活断層が確認されたとき、断層の一部しか地表にあらわれない可能性も考慮し一定の長さ(約 20 km 程度)あるいは一定規模($M_w \sim 6.5$)を想定するとともに、基準地震動が過小評価とならないように不確かさも考慮することなど、震源を特定せず策定する地震動と、震源を特定する地震動の境界がないように規定されている。このようないくつかの歯止めを掛けることにより、改訂指針で安全性の高い基準地震動の策定が可能となる、と考える。

指針の改訂において、もう 1 つの重要点である残余のリスクについても、その存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力を払うべきであると規定されている。残余のリスクの評価に不可欠な確率論的な地震動予測は、個々の活断層や海溝域における地震発生の確率をどのように評価するか、また地震動の評価に直接的に影響する距離減衰式のばらつきをどのようにしたら少なくすることが可能かなどいまだ多くの問題が残されている。

今回の耐震指針の改訂は、現時点における地震学及び地震工学に関する新たな知見の蓄積等を反映してなされた。最重要の変更点である基準地震動の策定方法は現状の技術レベルから見て最先端の知識に基づいた高度化が図られている。

基準地震動について、新たな評価方法を示すだけでなく、その限界を盛り込んでおり、世界に誇ることができるものであると私は考えている。残念ながら、議論の一部について全員の合意には至らず、最終段階で辞任された委員もいたが、はじめの段階で委員の間にあった大きな意見の隔たりが多く、議論により最終的には大変小さくすることができた。

注 1：策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、それらの結果として周辺公衆に対して放射線被爆による災害を及ぼすリスク。

参考文献

- 1) Nishimura, I., S. Noda, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe: Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, Transactions, SMiRT 16, Paper#1133, 2001.
- 2) 佐藤智美・片岡正次郎・奥村俊彦：K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性と推定式の検討、第 11 回日本地震工学シン

ポジウム論文集、2002 年、pp.615-620。

- 3) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 96, No. 3, 2006, pp.879-897.
- 4) 佐藤智美：宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の短周期レベルの推定、日本地震工学会論文集、第 4 巻、第 1 号、2004 年、pp.1-4。
- 5) 原子力安全基盤機構：海溝型固有地震の地震動特性に関する検討【概要版】、JNES/SAE06-098. 06 解部報-0098、2006 年。
- 6) 入倉孝次郎：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、第 47 号 A、2004 年、pp. 25-45。
- 7) 地震調査推進本部 地震調査委員会、「全国を概観した地震動予測地図」報告書（分冊 2）―震源を特定した地震動予測地図の説明―、2005
- 8) 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, Vol. 110, pp. 849-875.
- 9) 境有紀、額瀨一起、神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案、日本建築学会構造系論文集、第 555 号、2002 年、85-91。
- 10) 川瀬 博：建物の地震被害の予測とその軽減への展望、地学雑誌、110 巻 6 号、2001、pp. 885-899。
- 11) 香川敬生・壇一男・大塚康弘・本橋章平：確率論的地震危険度評価のための潜在断層地震の発生確率設定法、土木学会地震工学論文集、047 (CD-ROM)、2005 年。
- 12) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男：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、2004 年、pp.46-86。
- 13) Shimazaki, K.: Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, Earthquake Source Mechanics, AGU Geophysical Monograph 37, 1986, pp.209-216.
- 14) 松田時彦：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、28 号、1975 年、pp.269-283.
- 15) Stirling, M. W., Rhoades, D. and Berryman, K.: Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 92, 2002, pp.812-830.
- 16) 橋本徹夫・他：断層長さとモーメントマグニチュードの関係についての検討資料、論文準備中、2006 年。