

## 第4章

# 耐震安全性の確認

原子力安全委員会では、新潟県中越沖地震において想定を上回る地震動が発生したことを踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性について、耐震安全性評価特別委員会を中心に検討を進めてきました。

原子力安全委員会においては、新耐震指針や「活断層等に関する安全審査の手引き」といった最新の科学的知見を反映した判断基準

を用いるとともに、地震により得られた教訓や知見を反映することを、基本的な視点として検討を進めました。

以下では、具体的にどのような考え方で安全の確認を進めているのか、詳細を説明します。

### 第1節 新耐震指針

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(以下「耐震指針」とします。)は、原子炉の設置許可等に際しての安全審査において、原子力施設が供用期間中に極めてまれであっても発生する可能性のある地震による地震動に対しても、安全機能が損なわれることがない設計となっているかを確認するためのもので、原子力施設の耐震安全性を確保する上で最も重要かつ基礎的な指針となっています。

原子力安全委員会は、平成18年9月に、地震学・地震工学等の耐震安全性に関連する分野の最新の科学的知見を反映して、この耐震

指針を改訂しました。

原子力安全委員会は、この新しい耐震指針に基づいて、今後、安全審査を実施していきますが、併せて、既に許可が行われ、現在、運転中の既設原子力施設についても、新耐震指針に基づく耐震安全性の確認(これを「バックチェック」と呼んでいます。)を行うことが必要と判断し、耐震指針の改訂の際に規制行政庁に対し、実施を要請しました。

柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性についても、この新耐震指針に基づき、再評価が行われました。

### 第2節 活断層等に関する安全審査の手引き

新潟県中越沖地震の重要な教訓は活断層の評価に関するものでした。新耐震指針は、前述のとおり、活断層の調査について新しい規定を盛り込んでいますが、原子力安全委員会では、地震の教訓を踏まえ、こうした規定を具体的にどのように運用・解釈していくかということが重要と判断しました。この点に資するものとして、昭和53年に策定された「原

子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き」(以下「旧手引き」とします。)があります。この旧手引きは、耐震指針とともに見直しを検討していたものの、新耐震指針を策定する際に継続して検討する事項と位置付けられており、新耐震指針の要求事項が事業者において正しく実施されているか、また、規制行政庁において適切に審査されているか

## コラム 5

## 新耐震指針のポイント

新耐震指針では、以下の3点が基本方針となっています。

耐震設計上重要な施設は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から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恐れがあると想定することが適切な地震動（＝基準地震動）による地震力に対して、その安全機能が損なわれないように設計されなければならない。

更に、施設は、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点からなされる耐震設計上の区分ごとに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられるように設計されなければならない。

また、建物・構築物は、十分な支持性能をもつ地盤に設置されなければならない。

旧耐震指針との比較では、以下のような点が新耐震指針のポイントとなっています。

1. 最新の調査手法を総合した徹底的な活断層調査  
(調査対象範囲拡大、変動地形学等の重視、連動性の考慮、等々)
2. 基準地震動の評価方法の高度化  
「震源を特定して策定する基準地震動」の評価方法の最新化  
(敷地近くは断層モデル重視、三次元的地域特性・地盤特性等の考慮、不確かさの考慮、等々)  
「震源を特定せず策定する地震動」の敷地ごとの評価  
(詳細な調査により活断層が発見できない場合を想定した地震動も評価)  
「残余のリスク」の最小化(基準地震動を超える地震動が発生した場合であっても、事故につながるリスクを小さくするよう、詳細設計・施工等において考慮)  
基準地震動(Ss)による安全設計の余裕・信頼度について、弾性設計用地震動(Sd)による確認要求

(なお、新耐震指針の詳しい内容や策定に至る経緯については、平成18年版の白書で詳しく解説していますので、併せてご参照ください。)

を確認するための具体的要求基準が適切に定められているとはいえない状況にあったことから、旧手引きを全面改訂し、最新の知見を反映した手引きを策定することとしました。

こうした観点から平成20年6月に「活断層等に関する安全審査の手引き」(以下「新手引き」とします。)が取りまとめられました。新手引きにおいては、活断層の調査・評価に

際して、最新の手法を組み合わせる行うこと、判断に際しては、一貫した考え方の下、各手法による結果を相互比較して総合的に判断することを特に重視しています。

柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の再評価は、新耐震指針に基づくと同時に、この新手引きを参考にして行われました。

### 第3節 柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動

#### (1) 新たな基準地震動策定・評価の進め方

耐震評価に用いる新たな基準地震動の策定については、まず、敷地周辺の活断層を改めて調査・評価し、敷地に影響を及ぼす可能性があるものを特定します。その上で、地域特性等を十分に考慮しつつ、経験式を用いた手法と断層モデルを用いた手法の双方により、それらの活断層を震源とする地震により敷地において想定される地震動を求めるという手順で行われます。これらの作業は、新耐震指針及びそれを具体化するものとして原子力安全委員会が定めた新引き等に基づき、以下のような考え方に沿って東京電力(株)が実施しました。

- ・耐震設計上考慮すべき活断層としては、従来は5万年前以降に活動したものを対象としていたが、今回の評価では、新耐震指針を踏まえ、約12～13万年前以降の活動が否

定できないものにまで拡張する。

- ・基準地震動の評価においては、新潟県中越沖地震の観測記録の分析等により、地震伝播経路特性等を適切に反映する。
- ・震源断層の設定などに伴う不確かさを適切に考慮する。
- ・敷地から半径100キロ以内を対象に各種文献や地図などによる詳細な検討を行う。半径30キロの範囲については、露頭などの調査を詳細に行う。また、活断層や褶曲などの地殻変動に起因する地形である変動地形に注目して、その可能性がある地形を抽出し、検討を行う。地球物理学的調査として、陸域では地震探査、海域では海上音波探査などに基づく検討を行う。

原子力安全・保安院は、耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ(以下「合同ワーキンググループ」とします。)の専門家による検討を経て、基準地震動の策定が上記の視点を踏まえた適切

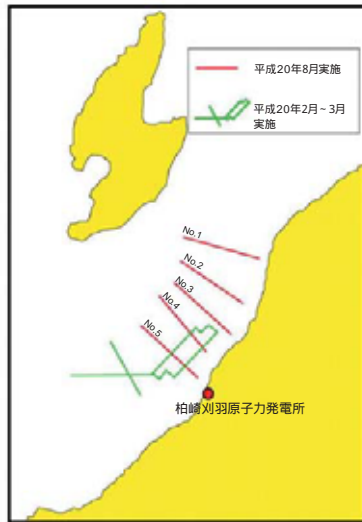
## コラム 6

### 新引きのポイント

1. リニアメント重視から地形発達過程(地形の成因を含む)重視への移行  
(成因を重視した変動地形学的調査、地表地質調査及び地球物理学的調査等を適切に組み合わせ、活断層に加え、活撓曲や活褶曲等についても十分に調査)
2. 各手法による調査結果の総合的な検討の重要性  
(各手法で調査結果が異なる場合はそれらの結果を相互比較して妥当性を検証し、総合的に判断)
3. 断層の三次元的形状の把握の重要性  
(三次元弾性波探査等を使用し、活断層の三次元構造を可能な限り把握)
4. 一貫した考え方にもとづく活断層の認定  
(耐震設計上考慮する活断層の認定については、一貫した認定の考え方により判断)
5. 必要に応じ調査原資料に立ち返った審査  
(安全審査に当たっては、できる限り原資料を確認)

なものであるか、評価を実施した。また、その過程で、原子力安全・保安院は海上音波探査や専門家を交えた現地調査、艀原子力安全基盤機構による解析作業などによる確認を実施しています。

図表1-4-1 原子力安全・保安院が実施した海上音波探査の調査測線図



(補足)  
平成20年2月～3月の調査では、天候不良により三次元調査は実施できなかったが、その調査範囲において測線を密にした二次元調査を実施し、海底面から5～6km程度までのデータを取得。  
また、平成20年8月の調査では、海底面から浅い範囲(100m程度)を精緻に把握すること及び海底面から2～3km程度までのデータを取得することを目的として実施。

## (2) 活断層評価の結果

原子力安全・保安院は、東京電力(株)による調査に加え、原子力安全・保安院独自の調査などを踏まえ、合同ワーキンググループでの慎重な審議を経て、柏崎刈羽原子力発電所に影響の大きい活断層は、海域ではF-B断層(長さ約36km)、陸域では長岡平野西縁断層帯(長さ約91km)と評価しました。なお、長岡平野西縁断層帯は角田・弥彦断層、気比ノ宮断層、片貝断層という複数の断層が南北に続くものであり、これらを総称するものです。

柏崎刈羽原子力発電所の敷地及び敷地近傍に存在する真殿坂断層については、活動性が認められないものと評価しました。

### 海域の断層

合同ワーキンググループでは、関係機関による調査研究などを踏まえ、敷地に影響を及ぼす可能性がある活断層として、F-B断層、

F-D断層及び高田沖断層に重点を置いて検討を行いました。

その中で、F-B断層については、音波探査記録の分析の結果、断層関連褶曲が認められ、活動年代の推定結果などから、評価対象とすべき活断層と評価されました。このF-B断層については、南端は断層に関係すると見られる褶曲構造が確認されなくなった場所としましたが、北端の位置が論点となりました。東京電力(株)は、海底地形に明瞭な背斜の高まりが見られる部分までとしていましたが、同ワーキンググループでは海底地形に僅かな変形が見られるところまで断層の存在が否定できないとする考え方が示されました。こうした議論を踏まえ、原子力安全・保安院はF-B断層について、東京電力(株)の約34kmという評価結果を変更し、約36kmまで考慮することとしました。

また、F-B断層北方延長部が更に北方の佐渡海盆東縁の大陸棚斜面部まで延びていると指摘する学者の論文があることについて、海上音波探査結果や陸域も含む地下探査データ等から、当該大陸棚斜面部の下には耐震設計上考慮すべき活断層は認められないと判断しました。こうした判断にあたっては、原子力安全・保安院が平成20年2月から3月及び8月の2回にわたり、新潟県中越沖地震の震源域において実施した海上音波探査結果も活用しました。いずれの調査においても、前述の論文で指摘されている大陸棚斜面下方には断層の存在を示唆する構造は認められませんでした。

F-D断層と高田沖断層については、個別に活動する断層と評価されるが、地震動評価においては、その同時活動を考慮すべきとしました。

### 陸域の断層

陸域の活断層については、東京電力(株)が地震探査や地表地質調査を行い、長岡平野西縁断層帯を構成する角田・弥彦、気比ノ宮、片

貝の各断層について活動性や長さなどの検討を行いました。東京電力(株)は、これらの断層について、主活動時期、平均的な変位速度等が異なること等からそれぞれ別個に活動するものとして評価することは可能であるが、不確かさへの考慮として、これら3つの断層を合わせた約91kmの区間が同時に活動する場合を考慮すべきであることとしており、原子力安全・保安院としても約91kmの区間の同時活動性を考慮することは、妥当と評価しました。この長さは、地震調査研究推進本部による評価である83kmを上回っています。

合同ワーキンググループにおける審議においては、長岡平野西縁断層帯について、地質調査結果や地震調査研究推進本部の知見を踏まえ、断層の傾きを50度と評価しましたが、この地域の堆積層が厚く、深部の構造が正確に把握できないことなどを踏まえ、不確かさを考慮して、断層面が発電所敷地に近くなる35度の傾きを考慮することとされました。

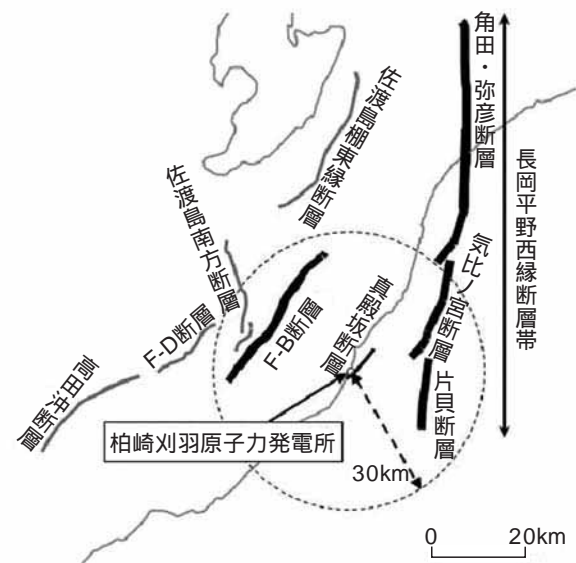
敷地の近傍にある真殿坂断層については、合同ワーキンググループにおいて、改めて慎重に検討を行いました。具体的には、変動地形的調査、地表地質調査、反射法地震探査等の結果に加えて、専門家の指摘に基づき敷地及び敷地近傍のボーリング調査を東京電力(株)に実施させました。

この結果、真殿坂断層を挟んで約24万年前の火山灰(阿多鳥浜テフラ)がほぼ水平に分布し、これより深部にある西山層(約200万年前から約500万年前の間に堆積した地層)以下の地層で観察される褶曲構造に対応する地形は認められませんでした。これは少なくとも24万年前以降、真殿坂断層は活動していないことを意味します。また、地震後の調査・測量において、新潟県中越沖地震に伴う真殿坂断層の活動を示唆する結果は得られていません。これらの点から、真殿坂断層は、耐震設計上考慮すべき活断層ではないと評価しました。

なお、地元団体から、真殿坂断層の活動性

等に係る地質・地質構造について、いくつかの問題提起(真殿坂断層沿いの地すべり等の変状地形、観音岬・椎谷付近の海底亀裂及び遺構等)がなされています。これらについて、原子力安全・保安院は、現地調査等の追加調査を行った結果、真殿坂断層の活動性を示唆するものではないと判断しました。

図表1-4-2 柏崎刈羽原子力発電所の耐震設計上考慮すべき活断層の評価結果



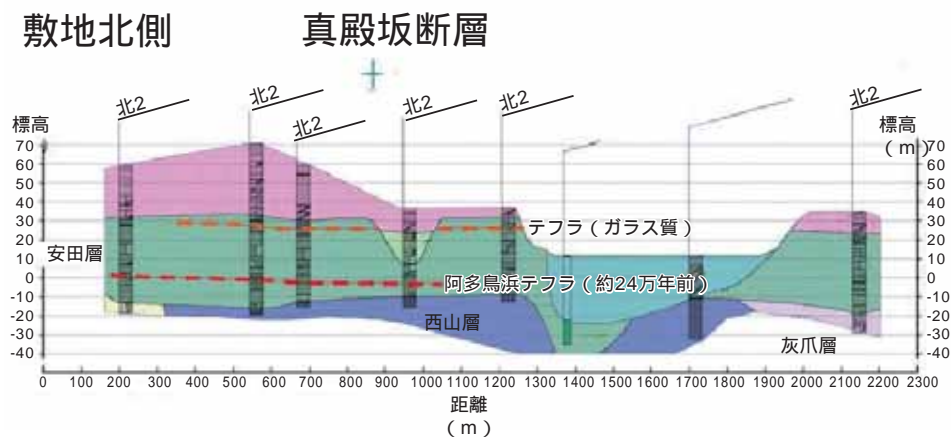
断層名	活断層の評価		
	既往の評価	今回の評価	同時活動性
佐渡島棚東縁断層	約39km	約37km	
F-B断層	約20km	約36km	
佐渡島南方断層	約21km	約29km	
F-D断層	約21.5km	約30km	↑
高田沖断層	約18.5km	約25km	↓
長岡平野西縁断層帯	約83km	約91km	
角田・弥彦断層	-	約54km	↑
気比ノ宮断層	約17.5km	約22km	↓
片貝断層	約10km	約16km	↓

海域は平成15年の評価

### (3) 新しい基準地震動の評価

活断層の評価が行われると、それらの活断層が震源となって発生する地震の規模を推定し、それが発電所敷地にどのような地震動をもたらすのかを評価します。これらを比較検討し、最も大きな揺れとなるような地震動を

図表1 - 4 - 3 阿多鳥浜テフラの分布(原子力安全・保安院合同ワーキンググループ第27回資料(合同W27 1)に加筆)



基準地震動として採用することとなります。

旧耐震指針では、敷地での地震動の大きさを評価するのに、経験式により、震源での地震の大きさ(マグニチュード)と震源からの距離からこれを算出していました。しかし、近年の地震観測記録の解析技術の向上に伴い、断層性状の評価技術の改善が進んできました。このため、新耐震指針では、従来の経験式を用いた手法に加え、地震を発生させる断層面を設定し、破壊開始点から次第に破壊が周辺に及び揺れが伝わっていく様子をモデル化して地震動を計算する「断層モデル」の手法を新たに全面的に取り入れ、両者の長所を活かすことにより、地震動の評価手法を高度化することとしました。今回の柏崎刈羽原子力発電所の地震動評価もこの考え方に従い、経験式と断層モデルの両手法による評価を行うこととしました。

東京電力(株)は、自ら行った活断層評価を踏まえ、平成20年5月22日、柏崎刈羽原子力発電所の新しい基準地震動を原子力安全・保安院に報告しました。東京電力(株)は、基準地震動策定の際に考慮すべき地震として、海域のF-B断層による地震、陸域の長岡平野西縁断層帯による地震(これに含まれる個々の断層による地震を含む)を採用しました。

東京電力(株)は、新潟県中越沖地震の観測データなどの分析に基づき、その特徴を踏まえた震源モデルと地震波の伝播経路特性も踏

まえ、基準地震動を策定したとしています。

原子力安全・保安院合同ワーキンググループでは、考慮すべき活断層の諸元が妥当か、新潟県中越沖地震の観測記録の分析等により、地震伝播経路特性等が適切に反映されているか等の論点を中心に、審議を重ねてきました。合同ワーキンググループにおいて検討を重ねた結果、東京電力(株)が当初評価していた活断層の諸元を変更したことは、上記の通りです。

東京電力(株)は、こうした活断層の諸元の変更等を踏まえ、基準地震動( $S_s$ )を見直し、9月22日に改めて原子力安全・保安院に報告しました。この見直しにより、基準地震動の最大加速度は、1～4号機側においては2,280ガルから2,300ガルに、5～7号機側においては、1,156ガルから1,209ガルにそれぞれ変更されました。なお、柏崎刈羽原子力発電所の設置時の基準地震動( $S_2$ )は、450ガルです。基準地震動は、地震の横波(せん断波)が700m/s以上の早さで伝わる岩盤において、その上の表土がないと仮定したときの地震動であり、柏崎刈羽原子力発電所の場合、原子炉の基礎版から概ね150～290メートルぐらい深い場所が基準地震動を評価すべき地点となります。施設の耐震安全性を評価する上では、基準地震動によって建屋がどう揺れるかが重要です。表土の影響や新潟県中越沖地震の観測記録も踏まえて評価した、上記

図表1-4-4 各号機地震動の評価結果

対象とする地震動（単位：ガル）	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機
新潟県中越沖地震（観測値、原子炉建屋基礎版上）	680	606	384	492	442	322	356
基準地震動による応答（原子炉建屋基礎版上）	845( 829 )	809( 739 )	761( 663 )	704( 699 )	606( 543 )	724( 656 )	738( 642 )
基準地震動の最大値（解放基盤表面）	2,300( 2,280 )			1,209( 1,156 )			
新潟県中越沖地震（解放基盤表面における推定波）	1,699	1,011	1,113	1,478	766	539	613

設置時の基準地震動は、450ガル。（ ）内は、東京電力㈱が平成20年5月22日に原子力安全・保安院に報告したものを示す。

基準地震動に対応する各号機原子炉建屋基礎版上での揺れは、1～4号機側704～845ガル、5～7号機側606～738ガルとなります。

なお、新耐震指針では、設定した基準地震動を超える地震動の発生確率（超過確率）を参照することを求めており、これを踏まえ、東京電力㈱は、日本原子力学会の基準に基づき、見直し後の基準地震動を超える地震動が発生する確率（年超過確率）を算定し、 $10^{-4}$ ～ $10^{-5}$ 回/年である旨、合同ワーキンググループに報告しました。また、糠原子力

安全基盤機構がクロスチェックを行ったところ、基準地震動に係る年超過確率は $10^{-4}$ ～ $10^{-5}$ 程度であり、東京電力㈱による評価とほぼ同程度の結果が得られました。

以上のような合同ワーキンググループでの審議を踏まえ、原子力安全・保安院は、東京電力㈱が見直した新しい基準地震動は、原子力安全委員会が策定した指針や原子力安全・保安院による活断層の長さ等の評価を踏まえたものであり、妥当であると判断し、中間報告書として取りまとめました。

## 第4節 新しい基準地震動に基づく耐震安全性の評価等

### （1）新しい基準地震動に基づく耐震安全性の評価

新しい基準地震動を策定した後は、それに対し現在の施設が耐えられるかどうかを確認するため、東京電力㈱が耐震安全上重要な建物・構築物及び機器・配管（以下「設備等」とします。）に加わる地震力を解析により求め、それによって耐震安全性評価を行いました。その方法の妥当性や評価結果については、原子力安全・保安院が構造ワーキンググループで審議するとともに、独自のモデルを用いた糠原子力安全基盤機構による解析により検証することとなります。

これまでに、東京電力㈱は、7号機について耐震安全上重要な設備等に係る耐震安全性の評価を終え、その結果を平成21年1月9日までに原子力安全・保安院に報告しました。それ以外の各号機についても順次同様の評価作業を行うこととしていますが、ここでは先

行している7号機について結果を説明します。

### （2）7号機の耐震安全性の評価

東京電力㈱は7号機について、耐震安全上重要な設備等に係る耐震安全性の評価を終え、その結果を平成21年1月9日までに原子力安全・保安院に報告しました。この報告では、評価対象の設備等について、新しい基準地震動に対する耐震安全性が確保されるものとしています。

これに対し原子力安全・保安院は、構造ワーキンググループにおける8回の審議を踏まえ、東京電力㈱による評価方法・結果の妥当性について厳格に確認し、原子力安全・保安院として、7号機の耐震安全上重要な設備等に係る耐震安全性は確保されたとした評価結果を取りまとめ、平成21年1月30日に原子力安全委員会に報告しました。原子力安全・保安院としての評価の内容は以下のとおりで

す。

#### 評価の方針

耐震安全性評価は、新しく策定した基準地震動に対して安全機能が確保されるかどうかを確認することです。すなわち、新しい基準地震動  $S_s$  に対して、「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」のそれぞれの機能が達成できるかを確認する。このため、評価対象施設は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」ための機能を有する原子炉建屋、原子炉冷却設備、計測制御系統設備等です。

評価は解析によって行うことになります。このため、解析結果が基準値を満足するだけでなく、解析手法が妥当かについて、構造ワーキンググループによって確認するとともに、独立原子力安全基盤機構による独自の解析プログラムで建屋・構築物、機器・配管の耐震安全性を確認することとしました。

#### 評価結果

##### (a) 評価手法の妥当性

原子炉建屋や機器・配管等の解析モデルは、原子炉建屋等の構造や周辺地盤の状況などを反映しており、新潟県中越沖地震時の揺れを再現できる解析モデルであり、妥当なものであることを確認しました。また、基準地震動は、新耐震指針に基づき解放基盤表面（7号機、地下約146メートル）に設定するため、建屋への入力地震動が妥当かどうかについても、新潟県中越沖地震における7号機建屋の基礎版上での揺れとこれにより算定される解放基盤表面上の地震動を基に、妥当であることを確認しました。

##### (b) 建屋・構築物

建屋・構築物としては、原子炉建屋、タービン建屋、コントロール建屋、非常用ガス処理系用排気筒及び非常用取水路が評価対象となります。

原子炉建屋等の建屋については、基準地震

動によって生じる耐震壁等のひずみが、耐震性を損なうような破壊等が生じないレベルとして設定されている基準値以内であることを確認しました。非常用ガス処理系排気筒については、基準地震動により各部材に発生する応力が部材ごとの基準値以内であることを確認した。また、非常用取水路については、地震力や土圧等から受ける力による変形等は基準値以内であり通水機能を損なわないことを確認しました。

##### (c) 機器・配管

機器・配管の評価は、構造強度の観点から評価を行うものと制御棒の挿入性や動的機能の保持が要求される機器に分けて評価を行いました。

評価の結果、原子炉本体、原子炉格納施設等の大型機器、ポンプ、熱交換器、配管等のその他の機器・配管については、いずれも地震によって加わる力と設備の自重や運転状態によって加わる力を合算した力により発生する応力は、機器等が機能喪失に至るような程度の塑性変形を生じないレベルとして設定されている基準値以内であることを確認しました。

基準地震動による解析から得られた燃料集合体の中央部の相対変位（約16mm）が、振動試験（規定時間内に制御棒が挿入されることを確認した試験）により確認された相対変位の値（40mm）よりも小さいことから、制御棒の挿入性は確保されることを確認しました。

非常用ディーゼル発電設備、ポンプ、弁等の動的機能が要求される機器については、基準地震動による解析の結果得られた当該機器に作用する加速度が、試験により動的機能維持が確認された加速度以内であることから、地震時にも機能が維持されることを確認しました。

#### (d) 隼原子力安全基盤機構によるクロスチェック

隼原子力安全基盤機構は、機器については、東京電力(株)の評価において新しい基準地震動に対する裕度が小さかった部位約30カ所及び制御棒を、配管については新潟県中越沖地震によるシミュレーション解析で地震により加わった力が大きかった主蒸気配管及び残留熱除去系配管を選定し、独自の解析モデルで評価を実施し、いずれも安全性が確保されているかどうか判断するための基準値以内であることを確認しました。

以上のことから、評価の対象とした安全上重要な建屋・構築物及び機器・配管は耐震安全性が確保されると判断しました。

#### (3) 地震随件事象等に対する安全性の評価

新耐震指針においては、津波等の地震随件事象によっても、施設の安全機能が重大な影響を受ける恐れがないことや、施設が十分な支持性能をもつ地盤に設置されなければならないことを求めています。これに基づき、東京電力(株)は、前述の耐震安全性評価に加え、津波に対する安全性や基礎地盤の支持性能等についても評価を行い、その結果を平成20年12月3日に原子力安全・保安院に報告しました。

原子力安全・保安院は、東京電力(株)による評価方法・結果の妥当性について、以下のとおり合同ワーキンググループでの審議を踏まえ厳格に確認し、原子力安全・保安院として、7号機の津波に対する安全性や基礎地盤の支持性能は確保されるなどとした評価を取りまとめ、前述の耐震安全性評価の結果と合わせ、平成21年1月30日に原子力安全委員会に報告しました。以下にその概要を示します。

#### (津波に対する安全性について)

柏崎刈羽原子力発電所7号機の原子炉建屋等の重要な施設が設置されている高さからみて、想定される津波による最大水位上昇に際しても施設の安全性が確保されるとともに、引波による最大水位低下に際しても、海水ポンプによる取水が可能であることから、津波に対する安全性は確保されると判断しました。

#### (基礎地盤の支持性能について)

柏崎刈羽原子力発電所7号機の原子炉建屋等の基礎地盤について、新しい基準地震動に対する応答解析を行った結果、建屋等を支持する上で支障となる連続した破壊面が形成されないこと、建屋等の下部にある活動性のない断層等に沿ったすべりに対する安全性に余裕があることや、建屋等の自重や新しい基準地震動により建屋に生じる地震力のうち鉛直方向に働く力を考慮しても、地盤の支持力に余裕があるとしていることなどから新しい基準地震動に対しても、同基礎地盤は支持性能を有するものと判断しました。

#### (新潟県中越沖地震後における建屋の上下変動量について)

新潟県中越沖地震後に観測された各号機の建屋の上下変動量のバラツキについては、地盤の物性、地盤の揺れや発生する応力が場所ごとに異なること等が要因として考えられるが、その原因を明らかにすることは困難であると判断されました。また、各号機の原子炉建屋、タービン建屋及びコントロール建屋の傾斜は最大でも約1/4,000あるが、傾斜を1/1,000としても、建屋や機器・配管系に作用する荷重の増加及びその影響は極めて小さく、また、傾斜による燃料集合体の変形量は、加振試験(制御棒が規定時間内に挿入されることを確認した試験)により確認された変形量に比べ僅かであり、安全上の問題はないことが確認されました。

(敷地周辺の活断層の活動に伴う地盤変動について)

敷地周辺の活断層の活動に伴う地盤変動については、F-B断層及び長岡平野西縁断層帯による地盤変動を想定した結果、7号機について想定される原子炉建屋、タービン建屋及びコントロール建屋の最大の傾斜は、それぞれ1/1,600、1/2,000及び1/1,400程度であるが、傾斜を1/1,000とした場合においても、建屋や機器・配管に作用する荷重の増加及びその影響は極めて小さく、また、傾斜による燃料集合体の変形量は加振試験により制御棒が規定時間内に挿入されることが確認されている燃料集合体の変形量に比べ僅かであることなどから、耐震安全上重要な建屋や機器・配管の機能は確保されるものと判断しました。

#### (4) 耐震補強工事について

東京電力(株)は、原子力発電所の耐震性を確保するには、一層の余裕を持つことが重要であるとの観点から、耐震性の余裕を向上させるため、新しい基準地震動による原子炉建屋基礎版上での揺れおよそ600ガル~850ガルを上回る1,000ガルを耐震補強用の地震動として設定し、これに対しても安全性が確保されるよう耐震補強工事を行っています。

柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋内には、停止中であっても放射性物質が存在しているため、たとえ東京電力(株)による自主判断であっても、速やかに耐震補強工事を行うことは、原子力安全・保安院としても好ましいことであると考えています。ただし、こうした取組の効果についても、原子力安全・保安院は厳格に確認し、その結果不十分であれば、同社に更なる耐震補強の実施を求めるなど必要な指導を行っていくことは言うまでも

ありません。

7号機の設備等は、前述のとおり新たに策定された基準地震動に対し耐震安全性が確保されていることを確認しました。原子力安全・保安院は、新耐震指針に基づく耐震安全性評価とは別に、7号機において実施された耐震補強工事について、その考え方と補強工事による効果を確認しました。

東京電力(株)は、以下の考え方に基づき耐震補強工事を実施しています。

原子炉建屋基礎版上で1,000ガルの揺れになるように定めた耐震強化用地震動を用いて耐震安全上重要な建物・構築物及び機器・配管系の動的解析を実施して、発生する応力が基準値に対して余裕の少ない部位を抽出する。

余裕の少ない部位にどの程度の地震力を想定して補強を行うかについては、耐震強化用地震動による動的解析の結果を参考にし、工学的判断により定める。

耐震補強工事を実施中に策定された基準地震動  $S_s$  に対して、動的解析を行い追加工事が必要とならないかチェックを行う。

原子力安全・保安院は、補強工事の効果を見るため、基準地震動  $S_s$  を用い、補強前と補強後を比べ、どの程度地震により加わる力が低減したかなどについて確認しました。その結果、例えば、原子炉の冷却機能を有する残留熱除去系の配管について、耐震安全性評価で用いた同じ手法で補強前を評価すると、配管に発生する応力が基準値を上回るが、補強後は、基準値の6割程度まで小さくなるなど補強工事により耐震性が向上したことが確認されました。

## 第5節 原子力安全委員会の指摘

## (1) 原子力安全委員会が示した留意点等

柏崎刈羽原子力発電所等の耐震安全性に係る検討状況について、原子力安全・保安院は、これまで原子力安全委員会の本委員会や耐震安全性評価特別委員会等の専門部会に報告してきました。これに対し、原子力安全委員会からは、原子力安全・保安院の検討状況を踏まえ、次のような指摘をしました。

## 原子力安全委員会の指摘

柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性について、原子力安全委員会では、以下のような決定を行いました。

(a) 「柏崎刈羽原子力発電所における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係る報告を受けて」(平成20年5月22日原子力安全委員会決定)

これは、既設原子力施設の耐震安全性の確認(バックチェック)において策定する基準地震動についても、特に基準地震動と実際に原子炉建屋などに作用する地震動(入力地震動)との関連について慎重に検討すること等を求めるものです。

(b) 「柏崎刈羽原子力発電所で取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告を踏まえてバックチェック結果の確認において検討すべき事項の追加について」(平成20年6月16日原子力安全委員会決定)

これは、地震動の評価における震源特性・地下構造特性については、柏崎刈羽原子力発電所のみでなく、他の原子力施設においても、適切に考慮されているかを検討すること等を求めるものです。

これに対し、平成20年9月4日に原子力安全・保安院は、震源モデルの不確かさの考慮についての考え方等を含む「新潟県中越沖地

震を踏まえ原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」を取りまとめ、電力各社に通知しています。

耐震安全性評価特別委員会等における指摘  
原子力安全委員会は、耐震安全性評価特別委員会において、本件について独自の検討を行いました。同特別委員会からも、原子力安全・保安院に対する指摘を行いました。

原子力安全・保安院による活断層評価や基準地震動についての検討状況に対し、平成20年9月25日の耐震安全性評価特別委員会では、以下の対応を求めました。

- (a) 新潟県中越沖地震を踏まえ、基準地震動  $S_s$  とは別に、新潟県中越沖地震で得られたデータを最大限に活用しつつ、地震調査研究推進本部による強震動予測レシピの考え方に沿った断層モデルに基づく確認用地震動を策定し、基準地震動  $S_s$  の妥当性を確認すること。
- (b) 今後の耐震安全性の評価において、原子炉建屋基礎版上への入力地震動を設定する際には、新潟県中越沖地震の観測記録等を適切に考慮すること。
- (c) F-B断層の長さを約36kmまで考慮することとした原子力安全・保安院の判断は妥当である。念のため、その根拠となる同断層北方の地形の成因等を詳細に説明すること。

これに対し、東京電力(株)は、耐震安全性評価特別委員会の指示にしたがった方法で策定した確認用地震動を平成20年10月9日の原子力安全・保安院の合同ワーキンググループにおいて報告し、この確認用地震動の大きさが、新しい基準地震動  $S_s$  と同程度であることが原子力安全・保安院において確認されました。

原子力安全・保安院は、これも含め、同年10月23日の耐震安全性評価特別委員会において、9月25日の指摘に対する同院としての考え方を説明するなど、原子力安全委員会の指摘に対応しました。

その結果、原子力安全委員会は、これを踏まえ、平成20年12月11日にまとめた見解において、特に上記(c)については、「当委員会は、上記斜面周辺の地下構造にはこれまでの調査結果では断層等の変形構造が認められないこと、また、段丘の高度分布は長岡平野西縁で確認されている角田・弥彦断層の活動によって説明できることを確認した。海岸段丘の隆起には非地震性地殻変動等が関与している可能性があり、そのメカニズムの解明は今後の研究課題と考えられるが、現時点において当委員会は、F-B断層の長さを36kmとする原子力安全・保安院の評価は適切であると評価する。」としています。

また、東京電力㈱が平成20年12月3日に原子力安全・保安院に提出した新しい基準地震動に基づく耐震安全性の評価結果についても、原子力安全委員会は、同年12月11日に以下の点について原子力安全・保安院が東京電力㈱に指示し、その結果を原子力安全委員会に報告するよう、原子力安全・保安院に求めました。

- (a) 旧耐震指針による入力地震動と新耐震指針に基づく基礎版上入力地震動との違いについて、当初設計において工学的判断から見込まれていた安全余裕との関連も含めて、わかりやすく明示すること。
- (b) 原子炉建屋及びタービン建屋に関する評価で用いた両建屋の地震応答解析モデルについては、当初設計時のモデルを修正している。この修正が、Ssに対する施設健全性に関する今回の評価結果に結果的にどの程度影響するかについて、改めてできるだけ定量的に示

すこと。

- (c) 新耐震指針に即した弾性設計用地震動Sd及び静的地震力による評価を、主要かつ代表的な施設について実施すること。
- (d) 安全性を確保するためにどのような方策が実際になされたかに関し、特に耐震強化の考え方や強化箇所を選定の考え方を、具体的な場所を挙げて整理して示すこと。

## (2) 7号機の耐震安全性に関する原子力安全委員会の見解

原子力安全・保安院は、前節で示した原子力安全委員会からの指摘、意見等への対応を含め、平成21年1月30日に「柏崎刈羽原子力発電所敷地・敷地周辺の地質・地質構造、基準地震動Ss及び地震随件事象の評価並びに基準地震動Ssに対する7号機の耐震安全性の評価に係る報告書」を原子力安全委員会に報告しました。原子力安全委員会は、耐震安全性評価特別委員会の検討の結果、原子力安全・保安院の確認結果を妥当とする見解を平成21年2月18日に決定し、原子力安全・保安院に通知しました(全文は参考資料2に添付)。

本見解をまとめるに際し、原子力安全委員会として特に留意した点、重要と考えた点は以下、に示す通りです(参考資料3参照)。

また、原子力安全委員会は、この7号機の耐震安全性に関する見解及び本編第3章で記述した施設健全性に関する見解を踏まえて、7号機については、起動させるのに必要な施設健全性及び、耐震安全性は確保されているとの見解を示しました。

### 基準地震動の評価

活断層等の評価については、極めて専門的であることから、主として地震・地震動評価委員会において、多様な視点から詳細な議論

が行われました。特に、柏崎刈羽原子力発電所敷地にとって重要な、海域のF-B断層については専門的議論を徹底することが肝要と考え、原子力安全・保安院の審議に参加しているこの分野の専門家と原子力安全委員会側の専門家との間での意見交換会を、異例ながら原子力安全委員会が主催し公開で開催しました。審議の過程（その速記録は公開されている）を通じ、F-B断層についての専門的審議が尽くされたと考えられ、原子力安全委員会はF-B断層に関する原子力安全・保安院の評価及びそれについての耐震安全性評価特別委員会の見解は適切と判断しました。

活断層等の評価とともに、震源として想定した活断層等からの地震動の評価もまた、当然のことながら極めて重要です。柏崎刈羽原子力発電所においては、海域のF-B断層とともに陸域の長岡平野西縁断層帯が、敷地に与える地震動の観点から重要であることが示されており、耐震安全性評価特別委員会等において、新耐震指針に照らし、これら地震動評価の妥当性に関し慎重な審議がなされています。長岡平野西縁断層帯については、旧耐震指針においては、個別断層に関する評価しか行われていないのに対し、新耐震指針が要求する不確かさの考慮を踏まえ、それら断層の連動性についても適切に評価されていることを確認しました。

F-B断層については、断層モデルによる評価の妥当性及び評価プロセスの説明性を高める観点から、妥当性確認のための確認用地震動に関する解析条件を耐震安全性評価特別委員会から示し、原子力安全・保安院を通じて東京電力㈱に別途の解析を求めました。原子力安全委員会が、F-B断層に基づく地震動評価が妥当と判断する主たる根拠は、この確認用地震動による評価結果に基づいています。

基準地震動に対する耐震安全性

耐震安全性の確認においては、基準地震動

の適切な策定とともに、原子炉建屋の基礎版の地震動及びそれに対する安全上重要な建物・構築物及び設備・機器類の健全性評価が重要であることを、原子力安全委員会は、折に触れて強調してきています。耐震安全性評価特別委員会においては、この点でも慎重かつ詳細な審議が行われました。いわゆる解放基盤表面の基準地震動から建物基礎版の入力地震動を決める具体的方法について詳細な説明を受ける必要性から、耐震安全性評価特別委員会とは別に地震動解析技術等作業会合を原子力安全委員会が主催し、公開で開催しました。

同入力地震動に基づいて建物自体及びその中に設置される機器・配管類の構造強度が評価され、耐震安全性はその評価結果として示されます。この点について、主として施設健全性評価委員会の場で審議されました。同委員会では、原子力安全・保安院ばかりでなく、東京電力㈱からも直接的に説明を聞き、専門的観点から詳細にわたる議論を行いました。その内容は、原子力安全委員会が決定した「新耐震指針に基づく柏崎刈羽原子力発電所7号機の施設健全性について」に詳しく述べたところです(全文は参考資料4に添付)。

原子力安全・保安院の報告にある内容を適切と判断するに当たっては、報告内容自身の妥当性を審議し確認するとともに、報告にない事項であっても委員会が重要と考える事項について、東京電力㈱から直接に情報の提供を求め審議しました。そのように直接的に提供された中で主な事項は、弾性設計用地震動Sdによる評価確認と、主要な設備・機器等に対する新耐震指針と旧耐震指針による評価結果の比較及び耐震強化工事を行った配管系に関する工事前後の評価結果です。

これらにより、それぞれ、基本的安全機能である「止める」「冷やす」「閉じ込める」に関わる代表的機器・配管系である、炉心支持構造物、残留熱除去系、原子炉压力容器、主蒸気系配管、原子炉格納容器についてみる

と、いずれも、弾性設計用地震動  $S_d$  によるまでもなく、基準地震動  $S_s$  による評価値において、弾性限基準の許容応力状態 (III<sub>A</sub>S) を満足していることが示されており、その点

から、新耐震指針によって十分な安全余裕のあることが確認されるなど、新耐震指針に基づく耐震安全性に係る信頼性及び説明性は一段と向上したものと考えています。

## 第6節 全国のその他の既設原子力施設の耐震安全性の確認(バックチェック)への教訓・知見の反映

原子力安全委員会からのバックチェック実施の要請を踏まえ、規制行政庁は、事業者に対しその旨の指示を行い、事業者において確認作業が行われてきました。

しかし、平成19年7月に新潟県中越沖地震が発生し、バックチェック作業の途中であった東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所において当初設計時の想定を上回る地震動により、広範な被害があったことから、バックチェックの進め方についても見直しが必要となりました。

具体的には、新潟県中越沖地震の教訓をその他の施設についても十分踏まえて確認を進めていくこと、また、安全性の確認をできるだけ早く行い、結果を公表していくべきことです。この観点から、原子力安全委員会では、平成21年1月8日に「新耐震指針に基づく既設原子力施設の耐震安全性の確認(バックチェック)に関する検討状況の報告について」を決定し、

国民への説明責任の観点から、既設原子力発電所のバックチェックの確認に係る検討を加速し、確認結果を可能な限り早期に公にすること

新潟県中越沖地震により得られた知見を適切に反映していく観点から、平成20年12月11日に原子力安全委員会決定した「柏崎刈羽原子力発電所敷地・敷地周辺の地質・地質構造及び基準地震動の評価に係る報告

書(中間報告)」に対する見解」を十分踏まえて今後のバックチェックに関する検討を進めること

を原子力安全・保安院に要請しています。

また、平成21年2月18日には、基準地震動  $S_s$  による施設の安全機能維持の把握をより確実なものとするための弾性設計用地震動  $S_d$  について、その位置付けを再確認し、段階的な評価を行うよう事業者に周知するよう、原子力安全・保安院に要請する原子力安全委員会決定を行い、同院に通知しました。

事業者は、平成19年3月末までに原子力安全・保安院に耐震安全性の確認(バックチェック)の中間報告(一部の施設においては最終報告)を提出しました。現在、原子力安全・保安院において確認作業が行われ、その結果が順次原子力安全委員会に報告されているところです。原子力安全委員会は、平成21年2月18日には、柏崎刈羽原子力発電所7号機以外でははじめての事例として、北陸電力(株)志賀原子力発電所2号機の耐震安全性に係る中間報告書に関する原子力安全・保安院の評価を妥当とする見解を決定しています。

原子力安全委員会は、他の原子力発電所等についても、原子力安全・保安院の確認結果について、更に新耐震指針及び新手引きに基づいて厳格に検討していきます。

## 第7節 耐震安全性に関する今後の検討課題

新潟県中越沖地震を踏まえた柏崎刈羽原子

力発電所の耐震安全性に関し、新潟県中越沖

地震による原子炉建屋基礎版上の最大加速度が設計時に想定された最大加速度を上回った要因、敷地・敷地周辺の地質・地質構造、柏崎刈羽原子力発電所の今後の耐震安全性を評価するための基準地震動等について、最新の科学的・技術的知見に基づき様々な角度から徹底した検討を行いました。その過程で、今後の原子力発電所の耐震安全性に係る信頼性の一層の向上を図る観点から、更なる科学的・技術的知見の蓄積の重要性など、今後取り組むべき課題も明らかになりました。原子力安全・保安院は、合同ワーキンググループ及び構造ワーキンググループにおける議論を踏まえ、今後の取組について以下のとおり取りまとめました。原子力安全委員会は、これについて平成21年1月30日に報告を受け、了承しました。その内容は以下のとおりです。

### (1) 新たな知見の反映の仕組みについて

原子力施設の安全審査においては申請時における最新の科学的・技術的知見に基づく厳正な判断に基づき審査を行っています。また、安全審査後は常に最新の科学的・技術的知見に照らしあわせて、更なる安全性の向上に努めており、平成7年には、耐震設計審査指針が制定される前に安全審査を行ったプラントについて、耐震設計審査指針に基づく耐震安全性の確認を実施しました。

しかしながら、原子力施設について、定期的に新知見を反映する具体的な仕組みを設けていたわけではなく、また、知見の反映に係る情報公開についてもルールが明確ではありませんでした。

地震関連分野は兵庫県南部地震以降、急速に新知見が得られてきています。原子力施設の安全性については、常に最新の科学的・技術的知見に照らし合わせて、さらなる安全性の向上に努めていくことが重要であり、今後も、耐震安全性に係る信頼性の一層の向上の観点から、継続的に新たな知見を反映すべく、原子力安全・保安院としてそのための仕

組みを整備していきます。具体的には、地震、耐震に関する知見の情報収集を継続的に行い、そのうち、原子力施設の耐震安全性評価に反映すべきものの選定等について、定期的に公開の場で検討します。また、事業者においても、申請時のみならず、許可後においても、敷地・敷地周辺の地質・地盤調査や地震観測の継続を含め、知見の収集・蓄積を図り、自らの施設の耐震安全性に係る信頼性の向上を図ることが重要です。

### (2) 確率論的安全評価について

新耐震指針において、基準地震動  $S_s$  については、その超過確率を参照することが求められています。また、合同ワーキンググループでは、特に不確かさの考慮における審議において、確率論的安全評価について、「超過確率を参照するに当たって目安となる数値を示すべきではないか」、「地震動だけでなく施設の耐力等をあわせて総合的に判断すべきではないか」、「基準地震動の超過確率が一定レベルを上回っているところについては基準地震動を引き上げる等の対応が必要ではないか」、「今回は指針に示されているとおり参照にとどめるべきではないか」等の様々な意見が出されました。このような議論を経て、原子力安全・保安院は新耐震指針を踏まえ、基準地震動策定に係る不確かさの考慮に当たって、超過確率を参照することとし、東京電力(株)による算定結果に加え、独立原子力安全基盤機構による算定結果も参照したところですが、今後、確率論的ハザード評価結果のレビューの方法等についても検討する必要があると考えています。確率論的安全評価は、安全性の相対的尺度に基づいて客観的議論を行うことができるため、有効な手法と考えられます。今後は、確率論的安全評価の試行的実施を進め、独立原子力安全基盤機構の協力を得て、超過確率等についてその内容を整理し、課題の抽出を行っていきます。

### (3) 地震動の観測について

#### 建物・構築物及び機器・配管の地震観測

新潟県中越沖地震の際、柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋の基礎版上及び中間階において得られた観測結果から、地震時の原子炉建屋の応答特性に係る貴重な知見が得られたが、基礎版及び中間階だけではなく各階に、更に、原子炉建屋以外の建物・構築物や機器・配管などにも地震計が設置されていれば、構造物のより詳細な実際の振動特性をより速やかに把握することができたと考えられ、構造物の地震応答解析技術の向上に寄与する貴重なデータが得られたものと考えられます。このような観点から、事業者において設備の地震観測の一層の充実を図るため、具体的な方策を講じることが重要です。

#### 地盤の地震観測

柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋基礎版上で大きな加速度が観測された要因の1つは、敷地の地下構造の特殊性によるものでした。このため、地震観測により原子力発電所固有の地下の地盤の地震動増幅特性を調査することが重要であり、断層モデルによる地震動評価のための地盤構造モデルの高度化や、敷地の地下構造として地震基盤が深く不整形な構造を呈している場合や地盤が褶曲構造を呈している場合など様々な条件下においても適用可能となるような高度な距離減衰式の開発が望まれます。

### (4) 調査・研究について

新潟県中越沖地震により観測された最大加速度が設計時において算定された最大加速度を上回った要因の分析を通じ、地震動評価における震源特性や断層の三次元形状、地下構造特性等の評価の重要性が一層明確に再認識されたことなどを踏まえ、耐震安全性に関する知見の一層の蓄積を図るための調査・研究をこれまで以上に積極的に推進することの必要性が強く認識されました。これは、新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性に関する検討を通じての教訓の1つです。原子力安全・保安院においては、これまで、特に、耐震安全に関する規制基準や評価手法の高度化の観点から、安全上重要な機器・設備の振動試験、震源断層の評価に関する調査、確率論的安全評価等について、主に糠原子力安全基盤機構を通じ調査・研究を実施してきました。平成21年度からは、原子力発電所の耐震裕度を定量的に評価する手法やサイト近傍で常時地震観測を行う等の調査・研究を拡充することとしています。原子力安全・保安院は、今後、新潟県中越沖地震による耐震安全性の検討の中で明らかになった課題も含め、関係機関との連携を密にするとともに、IAEAを通じた国際協力を強化し、耐震安全性に関する研究をより積極的に推進します。その際、研究成果については、広く国際的に情報発信を行い、世界共通の課題である耐震安全性の向上に積極的に貢献していきます。

原子力安全・保安院は、今後、これらの内容を実現するための具体的な検討に着手し、平成21年度より実行することとしています。