

## 設備健全性、耐震安全性に関する小委員会の議論の状況について

平成20年11月19日  
新潟県防災局原子力安全対策課

東京電力は、中越沖地震で想定を超える地震動を受けた設備、建物・構築物の健全性を確認するため、点検及び解析を行っている。

設備健全性、耐震安全性に関する小委員会では、現状では主としてこれらの点検及び解析の結果について議論を行っている。これまでの主な論点について、東京電力及び原子力安全・保安院の見解並びにそれに対する委員の意見等をまとめた。

### 1 開催状況及び議題

	開催日	議 題
1	3月14日	<ul style="list-style-type: none"> <li>国の調査・対策委員会等での検討概要</li> <li>東京電力の調査・対策委員会等への報告事項と検討状況</li> <li>今後の検討の進め方</li> </ul>
2	4月24日	<ul style="list-style-type: none"> <li>東京電力「7号機の設備健全性に係る点検・評価に関する中間とりまとめ（報告書）」について</li> <li>原子力安全・保安院「東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第7号機の設備健全性評価に係る中間報告（案）」</li> </ul>
3	5月12日	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力発電所の耐震設計について</li> <li>質疑への回答（硬さ測定による塑性ひずみの検出）</li> </ul>
4	6月19日	<ul style="list-style-type: none"> <li>各号機の点検・解析の進捗状況</li> <li>7号機の中間とりまとめ（建物・構築物編）等</li> </ul>
5	7月24日	<ul style="list-style-type: none"> <li>各号機の点検・解析の進捗状況</li> <li>硬さ測定結果</li> <li>系統別健全性確認</li> </ul>
6	8月21日	<ul style="list-style-type: none"> <li>各号機の点検・解析の進捗状況</li> <li>東京電力「7号機の設備健全性に係る点検・評価に関する報告書（建物・構築物編（案）」について</li> <li>質疑への回答（観測波と解析波の乖離等建物関係）</li> </ul>
7	9月24日	<ul style="list-style-type: none"> <li>各号機の点検・解析の進捗状況</li> <li>質疑への回答（塑性変形・硬さ測定、建物相対変位、点検方法等）</li> <li>東京電力「7号機の設備健全性に係る点検・評価に関する報告書（機器レベル）」について</li> </ul>
8	10月21日	<ul style="list-style-type: none"> <li>各号機の点検・解析の進捗状況</li> <li>東京電力「7号機の設備健全性に係る点検・評価に関する報告書（機器レベル、建物・構築物編）」について</li> <li>原子力安全・保安院「7号機の設備健全性に係る点検・評価に関する報告（機器単位）」について</li> <li>系統機能試験</li> </ul>
9	11月12日	<ul style="list-style-type: none"> <li>各号機の点検・解析の進捗状況</li> <li>東京電力「7号機の設備健全性に係る点検・評価に関する報告書（建物・構築物編）」について</li> <li>原子力安全・保安院「7号機の建物・構築物の健全性に係る点検・評価に関する報告」について</li> </ul>

## 2 これまでの検討（議論）項目

現在は、東京電力及び原子力安全・保安院からの報告を基に、7号機（機器単位、建物・構築物）の地震後の健全性を中心に議論を行っています。

これまでの主な議論について、その項目を以下に示します。

- 1) 各号機の点検・解析の進捗状況について
- 2) 柏崎刈羽原子力発電所の健全性評価単位について
  - ・ 地震全体の影響と号機単位での評価
- 3) 柏崎刈羽原子力発電所7号機の設備健全性評価（機器レベル）について
  - 点検及び地震応答解析について
    - ・ 狭隘部等の点検困難箇所の点検方法について
    - ・ 地震応答解析の手法（入力地震動の方向と大きさ）
    - ・ 解析応力と許容応力との差が小さい箇所の追加点検結果について
    - ・ 東京電力とJNESの解析結果の相違について（モデルと計算条件）
    - ・ SCC等劣化事象の地震による影響
    - ・ 動的機器の健全性評価（機能確認済加速度）について
  - 塑性変形（全体的な変形を弾性範囲に抑えよとの要求事項の確認）について
    - ・ 有意な塑性ひずみの大きさ（定量的検討）
    - ・ 硬さ測定の感度（塑性ひずみの検出性）
    - ・ 硬さ測定の有効性（形状の変化と材質の変化の観点から）
    - ・ 硬さ測定箇所の選定方法
  - 地震発生時の対応強化について
- 4) 柏崎刈羽原子力発電所7号機の設備健全性（系統レベル）について
  - ・ 系統機能試験の位置づけ及びその内容
- 5) 柏崎刈羽原子力発電所7号機の建物・構築物の健全性について
  - 点検及び地震応答解析
    - ・ 地震応答解析から求めた地震動波形と観測波形の乖離について
    - ・ 建屋の地震応答解析手法（連成解析の有無、地盤のゆがみの考慮の有無等）
    - ・ 建屋健全性評価（平均せん断力による評価等）について
    - ・ 建屋に発生したひび割れについて（目視検査結果と解析）
- 6) 設備の設計裕度について
  - 耐震設計技術者からの意見聴取
    - ・ 設計の保守性（設計過程の各段階における裕度）
    - ・ 地震発生時に起きた事象（スロッシング）と耐震設計について
    - ・ 点検困難箇所の点検方法
    - ・ 耐震設計審査指針のクラス分類とその考え方（波及事故等の想定）

### 3 これまでの主な議論（検討）の状況

#### 1) 各号機の点検・解析の状況について

##### 【委員からの意見等】

- ・当初、点検・解析は、1号機と7号機を平行して優先的に進めるとしていたにもかかわらず、被害が軽微であったとされる7号機のみが先行し、1号機については中間的な報告書すら出されていないのは納得できない。
- ・全体状況を把握する上で、地震観測記録から機器の応答がもっとも厳しいと考えられる3号機、4号機の点検・解析も急ぐべきである

→ 東京電力は、作業員の確保・配置の問題、1号機は設備も大きく、古いため、試験の準備（図面、書類等）に手間取り遅れているが、来年の初め位から報告できると説明した。また、3, 4号機についても緊急時概略目視点検において大きな損傷、変形がないことを確認していると説明した。

#### 2) 健全性評価報告のとりまとめ単位（号機）について

##### 【委員からの意見等】

- ・7号機を他の号機から切り離して、単独で断定的な結論を出してよいものか。
- ・全号機を見た上で、もう1度7号機の健全性の判断に反映させる必要があるのではないか。
- ・7号機のみでの健全性評価で、地震影響の全体像を把握することは難しく、他号機と比較検討した上で結論を示すべきではないか。現時点での報告は、あくまで暫定的な性格のものではないか。

##### 【原子力安全・保安院の見解】

- ・設備としては、号機を1つの単位（発電システムを単位）としており、安全上重要な機器は概ね同一建屋に設置されているので、地震の影響という観点から、その範囲で評価可能で、全号機まとめて評価する必要はないと考え、この考えに基づいて7号機に関する保安院報告（10月3日付け）をまとめた。なお、他号機を評価した結果、そこから得られた知見は、今後も十分に活用し、安全に万全を期すことは重要だと思っている。
- ・なお、これまで他号機で確認されている不適合事象については、7号機にも反映させた形で評価が進められていることを確認している。
- ・中越沖地震が、発電所全体にどのような影響を与えたかを評価するためには、1～7号機全てを考えなくてはいけないと思っており、1つの号機の結果から全体像を見るといったことは考えていない。

### 3) 7号機機器単位の健全性評価結果について

#### ア 塑性変形について

##### 【東京電力の見解】

- ・ 主要機器の点検においては、目視点検によって確認できるような大きな変形はなかった。
- ・ 機器や配管の応力解析結果からは、地震時に許容応力を超えるような応力は発生しておらず、概ね弾性限度に収まっている。東電の応力解析結果については、JNESがクロスチェックを行っているが、極端に異なる結果とはならなかった。

##### 【原子力安全・保安院の評価】

- ・ (安全上重要な) 設備・機器の健全性確認では、全体的な変形を弾性域に抑えるとの観点から、設計手法で採用されている基準値 ( $\text{III}_{AS}$ ) を、健全性を判断する一つの基準と位置付けた。7号機については結果として、この基準値を超えるものではなかった。
- ・ JNESのクロスチェックの手法は事業者の解析手法よりも若干厳しめであるが、その結果においても  $\text{III}_{AS}$  を超えているような機器はなく、健全性を確保していることを確認した。

##### 【委員からの意見等】

- ・ 今回の地震応答解析の精度を検証した具体的データ等を示すこと。
- ・ 溶接部、狭隘部等の点検困難箇所は塑性変形が発生していた場合、次に大きな地震動を受けた時に心配である。
- ・ 点検困難箇所については、類似箇所の点検結果を以て塑性変形していないとしているが、材料強度のバラツキ、機器の個別性等を考えると、その結果には必ずしも納得できない。

→ 東京電力から、解析において許容応力に近い応力が発生した箇所は追加点検により、点検困難箇所は代替点検等により異常がないと判断したとの説明がなされた。

## イ 硬さ測定について

### 【東京電力の見解】

- ・塑性変形の有無は、点検及び解析により確認できるものの、知見拡充のために実施する追加的な点検として硬さ試験を実施する。
- ・硬さ測定は、健全性（特に、疲労強度）に問題となるような塑性ひずみが生じていないことを確認することが目的である。
- ・予ひずみを付与した試験体を用いた実験から、8%までの塑性ひずみは疲労強度に影響を与えないことを確認した。
- ・今回の測定から、2～4%を超える塑性ひずみの検出が可能であることを確認した。また、8%を超えるような塑性ひずみは検出されなかった。
- ・地震応答解析結果から地震による応力が大きいとされた箇所とそうでない箇所の硬さの値を比較し、大きな差がなかったことから、地震による塑性変形は生じていないと考える。

### 【原子力安全・保安院の評価】

- ・硬さ測定の結果は補完情報だと思っており、今回の健全性評価の判断に用いてはいない。

### 【委員からの意見等】

- ・地震により重要機器に微小な変形が発生していない事を追加確認するため、日本原子力技術協会の提案も踏まえ選定した硬さ測定は、2%未満の塑性ひずみを検出できないことから、その感度は不十分であり、地震による塑性ひずみの有無を判定することはできないと結論付けるべきである。
- ・応力が大きいとされた箇所とそうでない箇所の硬さの値を比較し、「有意な差は確認されなかった」と曖昧な表現で報告されているが、「有意」の意味を説明するとともに、硬さ測定による計量的な判定は難しいと書くべきである。

→ 東京電力は、当初、地震により重要機器に微小な変形が発生していない事を追加確認する方法を探すために様々な手法を検討したが、現状では微小な変形の測定は困難なことが分かった。しかしながら、硬さ測定は、疲労強度に影響を与える有意な変形の有無の判定手法としては適切であったと説明した。

→ 原子力安全・保安院は、「有意」との言葉の使い方については、他号機について報告する折には、修正する等対応を検討したいと思うと説明した。

- ・東京電力は地震により発生した塑性ひずみが材料特性に与える影響として、低サイクル疲労強度を取り上げ、「8%までの塑性ひずみは疲労強度に有意な影響を与えないことが確認済みである」として、「地震応答解析結果、設備点検において塑性変形は認められていないため... 健全性は確保される」と述べている。これは、「全体的な変形を弾性域に抑えること」あるいは、許容応力状態をⅢ.Sとした評価基準を一方的に変更したとも解され、容認できない。

→ 東京電力から、硬さ測定は解析の補足的な点検と位置付けて行っているものであり、解析ではⅢ.Sを評価基準としているとの説明があった。

- ・東京電力は、「物を加工すれば10%位の永久ひずみは発生する。今回、実験を

して8%のひずみをかけても材料特性は変わらないことを確認している。」と述べている。これは「地震により弾性限界を超えた応力が加わり、塑性変形が生じたか否か」の議論を、機器の製造、成型加工段階における塑性変形に言及することにより、論点を曖昧にするものである。

→ 東京電力は、金属材料の特徴である延性を活かして製造過程で塑性加工させることは一般的で、塑性ひずみそのものが悪いものではないこと、及び今回の実機の測定では、材料及び測定のバラツキの範囲内の変化しか検出されなかったと説明した。

- ・ 硬さ測定は、本来、地震応答解析によって裕度が少ないとされた場所、すなわち「地震により、弾性限界を超えた応力が加わり、塑性変形が生じた可能性が否定できない」場所を対象として実施されたものである。ろ過水タンクの座屈部位の様な目視によっても確認できるほど大きく変形した場所の硬さが大幅に上昇するのは当然で、その事実を以って、塑性変形が生じた場合は、ひずみの検知が可能であることが確認されたとすることは、「微小の塑性変形の検知も可能」との誤解を与えかねない。
- ・ 東京電力は、本小委員会で報告した、硬さ測定により検出できるひずみの大きさを報告書に記載していない。本小委員会の存在意義に関わることでもあるから、報告書に反映させるよう、県は東京電力に対して強く要求すべきである。

→ 東京電力は、今後改訂する報告書へは反映すると説明した。

#### ウ 7号機機器単位の健全性評価について

##### 【東京電力の見解】

- ・ 設備点検の結果、異常ありと判定された機器は71あったが、原子炉安全上重要な機器については、構造強度や機能を阻害するような重大な損傷は確認されていない。なお、機器に生じた損傷は、取替・補修等を実施し、原形復旧する。
- ・ これまでのところ、点検及び解析から総合的に評価した結果、「止める」、「冷やす」、「閉じこめる」の安全機能は維持されていると考えている。

##### 【原子力安全・保安院の評価】

- ・ 保安院の点検においても、目視可能な範囲で大きな変形はなく、解析の結果においてもⅢASを超える値は確認されなかった。加えて、現実の設備の機能が維持されていることを立入検査等により確認を行っていることから、7号機の設備健全性は十分有すると思っている。さらに、今後実施される漏えい試験等への立会いを行い、引き続き健全性を確認していく。
- ・ JNESの解析により評価基準値を超えたメカニカルスナバについては、機能に異常がないことは確認されたものの、解析結果の追加的な評価を実施するよう東京電力に指示した。
- ・ 設備健全性に関する技術基準の要求内容は、地震時においても公衆に多大な被ばく影響を引き起こさないことが基本的な枠組みとなっている。従って地震時の設備はこの技術基準の要求する性能は満たしていたと考える。
- ・ 10月3日付けで公表した報告書は、現段階での中越沖地震による7号機機器単位への影響について、保安院の判断を整理したものである。発電システムとし

ての健全性については、系統試験、プラント試験の結果を踏まえて総合的に評価していく必要がある。

**【委員からの意見等】**

- ・原子力安全・保安院の健全性評価は、技術基準上要求される機能が維持されていれば良いとの視点で評価されているように思える。
- ・点検が不十分なところ（塑性変形の検出性、点検困難箇所の存在）、解析結果で評価基準値に非常に近い値もしくはJNESの解析では越えているものがあること並びに地震影響の全体像が把握できていないこと等の理由により、「健全性が維持されている」とは断定できない（グレーゾーンにある）と考える。
- ・現在異常ないと思われる機器であっても、微小な変形が発生している可能性があり、系統試験等で見つかる可能性もある。系統試験等の実施においては、その様な微小なものが検出される可能性についても言及すること。

→ 東京電力からは、系統試験等においても振動診断などの状態監視保全技術等を活用して、異常の有無を確認していくことが説明された。

#### 4) 7号機建屋の健全性評価結果について

##### ア 7号機建屋に生じたひび割れについて

**【東京電力の見解】**

- ・構造上問題となる幅1.0mmを超えるひび割れは発生していない。
- ・各階のせん断ひずみは、壁にひび割れが発生する目安値を下回っていることから、概ね弾性範囲にあることを確認した。
- ・せん断方向に確認されている微細なひび割れは、乾燥収縮等によるものも含まれている可能性はあるものの、地震により発生したものと評価している。これらは、全て補修することとしている。

**【原子力安全・保安院の評価】**

- ・耐震壁の最大せん断ひずみは、ひび割れ発生日安値を下回っており、建屋の健全性は確保されていると考える。
- ・原子炉建屋・タービン建屋の耐震壁に、構造上問題となる1.0mm以上のひび割れは確認されなかった。

**【委員からの意見等】**

- ・耐震壁等のひび割れについては、せん断ひずみがひび割れ発生日安値以下であるにもかかわらず確認されており、シミュレーション解析と実際に起きていることに矛盾があるように思える。
- ・ひび割れ発生の引き金として地震力は働いたが、その時に入ったひび割れは乾燥収縮程度のものと考えて良いのか。

→ 東京電力は、過去の実験では、ひび割れ発生日安値の半分程度で微細なひび割れが発生することも多いため、実際に起きていることと矛盾はしないと考えるが、乾燥収縮によるものが含まれている可能性も否定できないと説明した。

## イ 7号機建屋の地震応答解析による地震動波形の再現性について

### 【東京電力の見解】

- ・ 建屋各階の応答解析は、原子炉基礎版上で観測された波形を伝達関数を用いて変換したものを使っている。変換した波形は、中間階で観測された波形と比較することで、整合性を確認している。
- ・ 水平方向の地震波は、解析モデルの見直しを行った結果、一部で解析波形が観測波形を上回っているものの、全体的な整合性は高まった。
- ・ この解析波形を用いても、設計時の許容限度は超えていないため、健全性に問題はないと考えている。

### 【原子力安全・保安院の評価】

- ・ 7号機地震応答解析については、設計モデルに実際の剛性等を考慮し、地震観測記録と概ね整合する妥当な解析モデルにより地震応答解析が行われていると評価

### 【委員からの意見等】

- ・ 健全性評価を行うためには、地震動の再現が前提条件となるが、解析モデルを見直す（精度を向上させる）ことで、解析波形と観測波形の乖離をなくすことが可能ではないか。
- ・ 解析波形と観測波形の一部にズレはあるが、地震応答解析では、大きな波形を用いており、安全側に立った評価となっていると理解できる。

## ウ 7号機建物・構築物の健全性評価結果について

### 【東京電力の見解】

- ・ 点検において、評価対象とした原子炉建屋、タービン建屋、排気筒及び非常用取水路については、技術基準上の要求性能を損なう事象は確認されなかった。
- ・ 地震応答解析においても、評価基準を満足することを確認した。

### 【原子力安全・保安院の評価】

- ・ 評価対象である建屋・構築物いずれもその構造・機能に影響を与えるような損傷はなかった。
- ・ 地震応答解析は、地震の観測記録と概ね整合する解析モデルにより解析が行われており、その結果、建屋・構築物に生じる力は、いずれの部位でも弾性範囲内であるか、もしくは変形量が基準値以下であった。
- ・ JNESによるクロスチェックが、東京電力による地震応答解析結果とほぼ同様の結果であった。
- ・ 以上のことから、建物・構築物の健全性は確保されていると評価

### 【委員からの意見等】

- ・ 地震応答解析の条件に、乾燥収縮による内部応力、コンクリートの初期ひび割れ等の条件を入れなければ、解析の保守性は担保できないのではないか。

→ 原子力安全・保安院から、応答値への影響は小さいと考えているので、考慮しなくてもよいと考えているとの説明があった。

- ・バックアップ設備として重要で、安全上も大きな意味を持つ設備であるディーゼル発電機用軽油タンクの点検結果も報告に加えるべきである。

## 5) 設計裕度について

- ・今回、想定していた基準地震動を超えたことについて、委員からの要請により、原子炉安全性の観点から設計技術者に話を聞いた。

### 【設計技術者の見解】

- ・点検困難箇所は、構造上同等な箇所を点検することで評価してもよいと考えるが、地震による推定応力が許容応力以上となるようであれば、材料証明書の強度等実際の値（実力値）を用いて解析を行い、評価すべきである。
- ・点検困難箇所につき機能確認できない場合は、構造が同等で、より弱い部位を重点的に調べることで確認できると考える。
- ・中越沖地震で観測された地震動が、基準地震動より大きかったにも拘わらず、設備が壊れなかった要因は、設備に係る応力算出の各段階における余裕率が大きく見込まれていたためである。
- ・基準地震動を超えたことは意外であったが、スペクトルから、構造的には大丈夫と確信した。
- ・設計における裕度は、設計者の経験によるところが大きく、今回はかなり大きな余裕が見込まれていた。

### 【委員からの意見等】

- ・設計上の余裕がどの位あるのかを具体的に明らかにすべきである。
- ・1号機、もしくは、3，4号機の報告段階で、今回招聘した設計関係者と異なる意見を持った方から、話を伺いたい。
- ・耐震重要度分類において重要度が低い機器の損傷・事故による、より上位の機器への波及（影響）について検討したい。