

3. 4 土木構造物関連

3. 4. 1 原子力発電所および基礎

(1) 被災の実態

地震の影響による不適合事象は 3,300 弱に及ぶが、6 段階評価による 4 段階目の C グレード（品質保証の要求事項に対する軽微な不適合事象等）以下がほとんどで、A クラスの施設には損傷はなく、原子炉の 3 つの基本的安全機能（止める、冷やす、閉じ込める）は確保されている。主な不適合事象は以下の①～⑥である。

- ① 3 号機タービン建屋外部の変圧器において火災が発生
- ② 6 号機において微量の放射能を含んだ水が外部へ漏洩
- ③ 7 号機において主排気筒より放射性物質を検出
- ④ 6 号機原子炉建屋天井クレーン駆動軸が損傷

以上の①～④項目は既に他部門で言及しているのでここでは割愛する。

⑤ 1 号機原子炉複合建屋地下 5 階への浸水

1 号機原子炉複合建屋の外壁近傍（土中）での消火系配管の損傷により漏洩した水が、地下 1 階のケーブル貫通部から流入し、地下 5 階で約 2000m³の水溜まりが確認された。

⑥ 基礎の不等沈下による建屋の傾斜

地震による建屋の傾斜は 6/7 号機コントロール建屋が最大であるが、傾斜量 1/4200 程度であり、常時沈下限界値の目安(1/2000～1/1000)に比べて、十分に小さい。



写真-3.4.1 消火系配管の損傷状況
(出典：原子力・安全保安部会)¹⁾

(2) 復旧・復興状況

前述した不適合事象に対する復旧の基本方針と復旧工事の進捗状況を以下に示すが、他部門でと重複しない⑤と⑥について記載する。

⑤ 1 号機原子炉複合建屋地下 5 階への浸水

原因は地震により損傷した消火系配管からの漏水が、損傷したケーブル貫通口から流入したと推定される。漏えい量は約 2,000m³、採取した試料からは放射性物質が検出（放射能濃度は約 6 ベクレル/cc と評価）された。

消火系配管の溶接継手化、フレキシブル化（建屋近傍部）を実施し損傷を防止する方針であり、平成 20 年度中に完了予定である。



写真-3.4.2 消火系配管の応急復旧状況
(出典：原子力・安全保安部会)¹⁾

⑥ 基礎の不等沈下による建屋の傾斜

不等沈下の原因は、大局的にはこの地域全体が北に向かって隆起しているためであり、建屋の傾斜もこれに整合している。局所的な差は地盤物性の差異によるものと推定されている。

(3) 今後の対応方針

前記の不適合事象に対する今後の対応方針についても⑤と⑥について以下に示す。

⑤ 1号機原子炉複合建屋地下5階への浸水

消火用水が大量に流入したことによる設備上の問題点の有無等について検討が必要である。

⑥ 基礎の不等沈下による建屋の傾斜

更なる耐震化により、基礎の不等沈下による建屋の傾斜は小さくなり安全側になるので問題が無い。

参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会 原子力・安全保安部会 中越沖地震における原子力施設に関する調査・対策委員会 (第2回) 資料2 新潟県中越沖地震に影響について

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70813a03j.pdf>

3. 4. 2 建屋、基礎および周辺構造物

(1) 被災の状況

原子炉建屋、タービン建屋等、耐震クラスの高い建屋については目視で確認した範囲においては健全な状況が維持されており、損傷は原子炉建屋外部で安全上の耐震クラスの低い周辺構造物が多く、不適合の程度も C グレード以下の軽微な事象になっている。

尚、変圧器基礎ボルト、タービン軸受台の基礎損傷、天井クレーン損傷については 3.2 項および 3.3 項で詳述している。

1) 建屋

- 3 号機ブローアウトパネルのはずれ

主蒸気管が破断した場合などの際に、タービン建屋内部の過圧を防止するために開くブローアウトパネルが、地震の強い揺れで外れた。

- 1 号機消火系配管の損傷に伴う、原子炉複合建屋地下 5 階への浸水 (3.4.1 (1) ⑤ 参照)

2) 周辺構造物

- 周辺地盤が沈下、液状化

軽油タンクの周辺地盤が沈下（耐震設計の施された軽油タンクには問題なし）し、安全上の重要度の低い、ろ過水タンクの基礎ボルト損傷、変圧器周辺の堰の損傷、ヤード・道路の液状化による、陥没、亀裂、段差などが生じた。

- 変圧器周辺の防油堤の損傷
(写真-3.4.3 参照)
- 発電所構内道路の陥没
- 主排気ダクトの接合部のズレ
(写真-3.1.4 参照)
- 誘雷鉄塔の一部破損
- 取水路保守用クレーンのレール破損



写真-3.4.3 4号機 主要変圧器防油堤の沈下、傾斜
(東京電力(株)提供)

(2) 復旧・復興状況

1) 建屋

建屋については、建屋内設備も含めて、目視点検結果と地震応答解析結果、必要に応じた追加点検結果をあわせて、健全性の総合評価を行う計画とし、1～7号機ごとに、点検・評価計画書を作成し、原子力・保安院の確認（中越沖地震における原子力施設に関する調査・対策委員会－耐震構造設計小委員会）を踏まえて、作業が進められている。

点検・調査及び解析による健全性の総合評価のフローを図-3.4.1 に示す。

【目視点検結果】

7号機を先行して、点検調査が進められており、目視点検を平成20年4月末、地震応答解析を3月末に、そして健全性の総合評価を5月末に完了する工程で進められている。

7号機原子炉建屋の点検結果は3月11日に提出されており、建屋耐震壁に若干の地震によるものと思われるひび割れが発見されているが、ひび割れの最大幅は0.3mmで、ガイドライン(EPRI NP-6695 Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake)において重大な損傷とされるひび割れ幅約1.5mmを下回っている。また、剥離、剥落は発見されていない。

【傾斜の測量結果】

建屋についての傾斜は、測量の結果、6号機、コントロール建屋で最大約1/4,200(7号機では原子炉建屋で1/4,700)にとどまっており、日本建築学会による、傾斜限界値の目安値1/2,000を下回っている(図-3.4.2)。

【地震応答解析】

点検調査と平行して進められている、観測された地震波による地震応答解析における中間報告(10月23日報告)では、全ての号機で、最大せん断応答ひずみは、せん断ひび割れ発生目安値を下回っており、変位量は弾性範囲内であると評価している。

7号機の解析結果を図-3.4.3に示す。

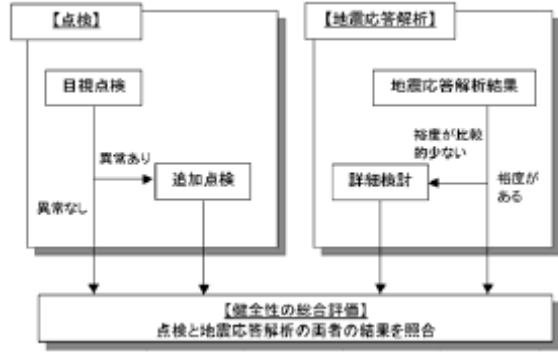


図-3.4.1 建物・設備の健全性の総合評価フロー (東京電力(株)提供)



図-3.4.2 建屋の測量結果 (東京電力(株)提供)

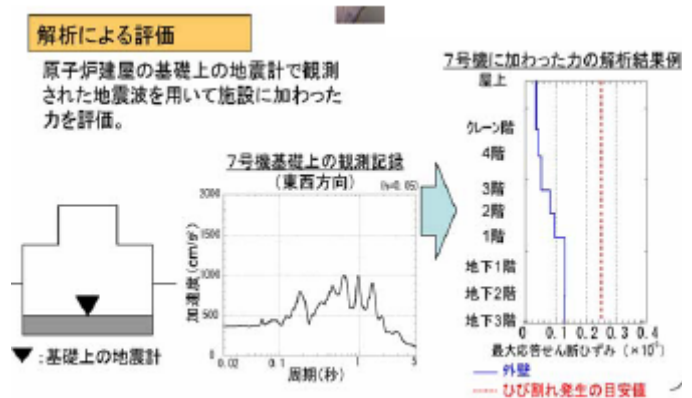


図-3.4.3 7号機 地震応答解析結果 (出典：原子力安全・保安部会)

【耐震性能と限界状態の考え方】

耐震壁の構造評価については、地震応答解析により得られた各階のせん断応力度と設計配筋量（耐震壁内の鉄筋量）によって負担できるせん断応力度とを比較することによって評価を行うことを原則としている。また、耐震壁の限界状態は、終局せん断耐力実験値と修正広沢式計算値の関係を考慮し、実験結果から得られた終局限界のせん断ひずみ 4.0×10^{-3} の半分の値 2.0×10^{-3} 想定している。その結果、終局せん断ひずみは、せん断ひび割れ発生の目安値 (0.25×10^{-3}) の約 10 倍となり、目安値内の応答値となる建屋外壁は、終局限界状態に対して相当な余裕度を持っている結果となる。

コンクリート強度に余裕度が存在しているのは、設計基準強度に対して、実際のコンクリートはばらつきを考慮し、確実に強度が出るように余裕を持って調合されている。また、経年変化を経たコンクリートコアの圧縮試験を実施した結果、実強度が 7 号機を例にとると設計強度 330 kg/cm^2 に対し、 500 kg/cm^2 に増加していることと当初設計では考慮に入れてなかった 2 次部材（非構造体の壁等）の影響が考えられる。

2) 周辺構造物

主排気ダクトの接合部のズレの応急復旧、建屋近傍の段差処理の仮復旧、本格復旧となるろ過水タンク基礎部の補強工事状況等、機能回復に向けた復旧が鋭意進捗されている状況を確認した。



写真-3.4.5 建屋近傍の埋戻土の沈下・仮復旧状況（地震直後と現在）
（東京電力(株)提供）

周辺埋戻土の沈下を想定し、段差対策としてタンク等にはフレキシブルジョイントが施工されていて効果的であった。

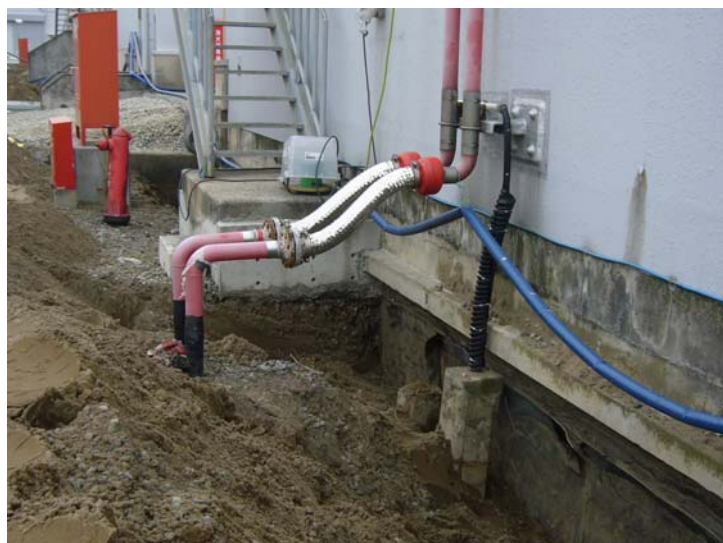


写真-3.4.5 段差対策

(東京電力㈱提供)

(3) 今後の対応について

建屋については、平成 20 年 4 月時点で、詳細な点検と地震応答解析による健全性の総合評価の途上にある。今後は下記のような検討・対策を踏まえて災害に強い発電所作りに向けた取り組みが進められる。

- ・ 中越沖地震の観測結果に加え、3 月末までに実施の地質調査に基づき、周辺の活断層を評価して、新たな基準地震動を策定する。基準地震動は国の審議を踏まえて確定する。
- ・ 確定した地震動による重要施設の地震応答解析の実施と評価。
- ・ 設計余裕度の定量的確立。
- ・ 必要に応じた補修、補強対策の計画と実施。

3. 4. 3 地盤および埋設構造物

(1) 被災の状況

1) 構内道路舗装面の亀裂

発電所内における構内道路舗装面の亀裂の発生位置を写真-3.4.6 に示す。舗装面の亀裂は所内全域に渡って生じている。特に、地上構造物周りや埋設構造物沿い、建設時の掘削線に沿った亀裂が観測されている。これらの主たる原因としては、液状化に伴う地盤の沈下と側方変位と推察される。

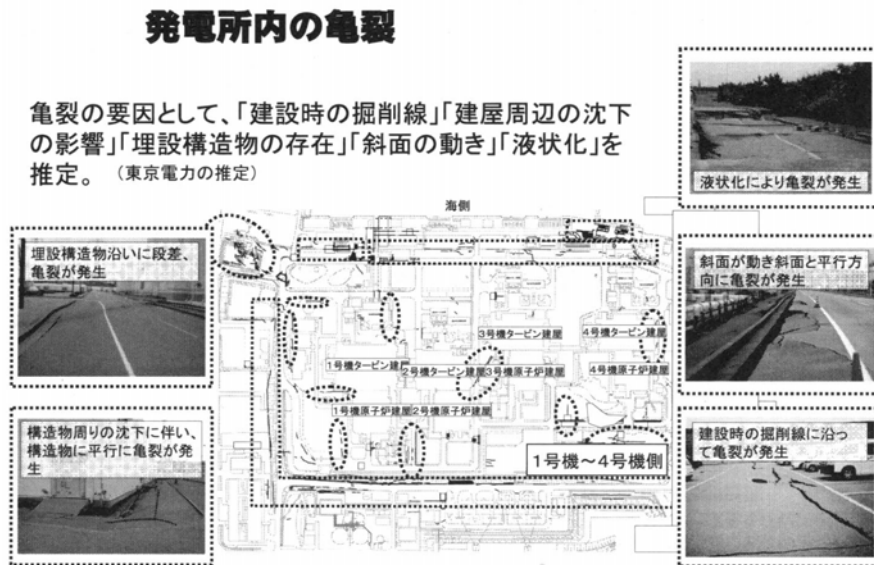


図-3.4.5 発電所内の構内道路亀裂発生位置図(出典:原子力安全・保安部会)

地盤の弱い道路では、液状化による陥没、段差などを発生

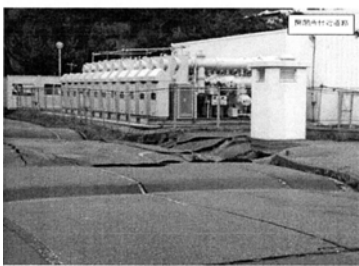


写真-3.4.6 道路舗装面の亀裂・段差
(出典:原子力安全・保安部会)



写真-3.4.7 クレーンレールの破損
(出典:原子力安全・保安部会)

2) 地盤沈下

発電所内で特に大きな地盤沈下が観測された箇所を写真-3.4.5 に示す。大きな地盤沈下は建屋近傍、地下水位の高い海側、埋め戻し土が厚い箇所で見られた。地盤沈下の原因としては、液状化、埋め戻し土の体積圧縮、および地震時の慣性力による揺すり込みなどが考えられる。

発電所内の地盤の沈下

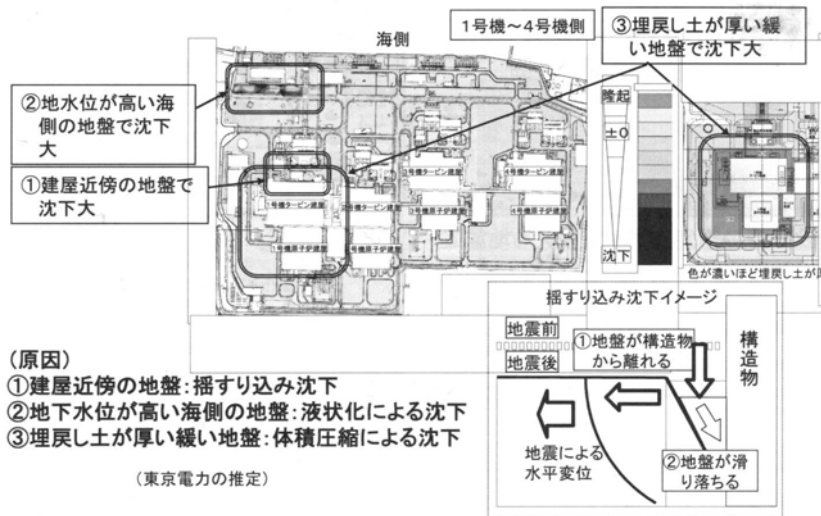


写真-3.4.8 A系タンク近傍の埋め戻し土の沈下 (東京電力(株)提供)

図-3.4.6 発電所内の大きな沈下発生箇所 (出典:原子力安全・保安部会)

(2) 復旧状況



写真-3.4.9 構内道路亀裂の復旧状況



(東京電力㈱提供)

写真-3.4.10 建屋近傍埋め戻し土地盤沈下の復旧状況

(3) 液状化への考察と埋戻し土沈下実験

1) 液状化

埋戻材の材質は現地砂質土を使用しているが、敷地内で液状化が発生した箇所は建屋より離れた、山側や海側で埋戻し土の液状化が確認されている。締固め度は、施工時の品質管理で概ね 95%以上、一部 90%以上で管理されている。一般部（建屋など構造物から離れた場所）の地盤沈下は、強い地震動によって不飽和土では繰り返しせん断に伴う体積圧縮、地下水位以下の飽和土では液状化に伴う体積圧縮が生じて地盤の沈下が生じたと考えられる。さらに、大がかりなサブドレインで常時ポンプアップを実施しているため、建屋周辺では不飽和地盤を保ち液状化は発生しなかった。

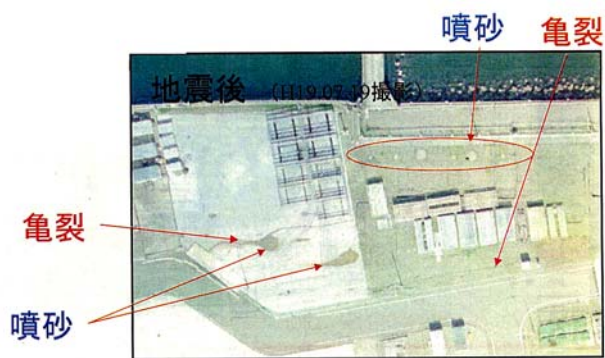


図-3.4.7 液状化範囲（東京電力㈱提供）

（建屋など構造物から離れた場所）の地盤沈下は、強い地震動によって不飽和土では繰り返しせん断に伴う体積圧縮、地下水位以下の飽和土では液状化に伴う体積圧縮が生じて地盤の沈下が生じたと考えられる。さらに、大がかりなサブドレインで常時ポンプアップを実施しているため、建屋周辺では不飽和地盤を保ち液状化は発生しなかった。

2) 埋め戻し土沈下

A系タンクにおいて最大 1.5 m 沈下が発生した。重要構造物の A 系タンクが岩着で、周辺地盤が地震時に構造物と地盤の接している周辺で歪みが大きく発生し、揺すり込み沈下が発生した。埋め戻し土の沈下（大きな局所沈下）のメカニズムの解明が重要となる。

埋戻し土は、地震時に建屋に比べて相対的に大きな水平変位が生じる。このため、地震時に建屋から埋戻し土が離れようとする際に主動すべりが生じ、その累積によって建屋周辺に大きな沈下が起こったものと考えられる。詳細なメカニズムについては、振動台実験などで現在検討中である。

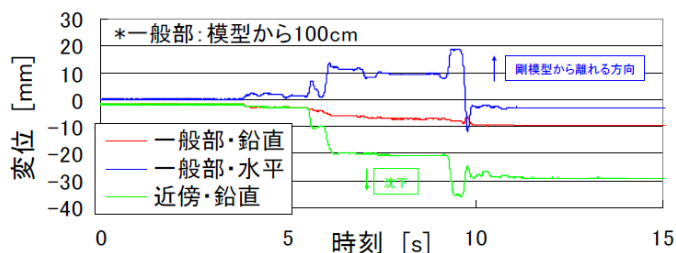
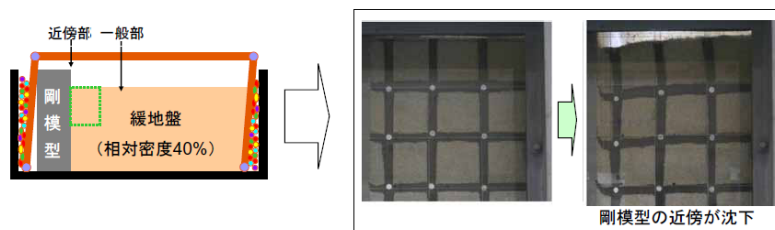


図 - 3.4.8 建屋近傍の沈下メカニズムの模型振動実験（東京電力㈱提供）

水平変位（青線）が大きくなる箇所で構造物近傍の地盤の鉛直変位（赤線）が増大している。