

中越沖地震を踏まえた地盤変位に対する設備の設計及び 事後保全に関わる対策について

東京電力(株)
東京電力(株)

長澤 和幸
古谷 賢

Kazuyuki NAGASAWA
Masaru FURUYA

平成 19 年 7 月 19 日午前 10 時 13 分頃、新潟県中越沖においてマグニチュード 6.8 の地震が発生し、東京電力柏崎刈羽原子力発電所においては各号機で設計時の応答加速度を超える最大加速度を記録したが、耐震重要度 S クラス機器に損傷は確認されなかった。耐震重要度 B クラス機器については、一部機器に軽微な損傷が確認された。耐震重要度 C クラスの機器については、建屋間を接続する又は建屋外で変位が生じた地盤に設置された機器で影響が確認された。

損傷が確認された耐震重要度 C クラスの機器に共通する点は、地震により機器が設置されている地盤に変位が発生したことである。したがって、上位の耐震重要度機器への波及的影響防止の観点から、屋外に設置する耐震重要度の低い設備については、事後保全設備として管理できるが、設置状況に応じて地震による変位防止対策又は変位緩和対策を図ることが、設備保全上、最適な防護戦略と言える。

1. 新潟県中越沖地震の概要

平成 19 年 7 月 19 日午前 10 時 13 分頃、新潟県中越沖において、大きな地震が発生し、新潟県と長野県で最大震度 6 強を観測したほか、北陸地方を中心に東北地方から近畿・中国地方にかけて広い範囲で地震動が観測された。気象庁発表(平成 19 年 7 月地震・火山月報(防災編))によれば、マグニチュードは 6.8、震源の深さは 17km であり、震央距離 16km、震源距離約 23km に位置していた柏崎刈羽原子力発電所は地震発生により大きな地震動を受けた。

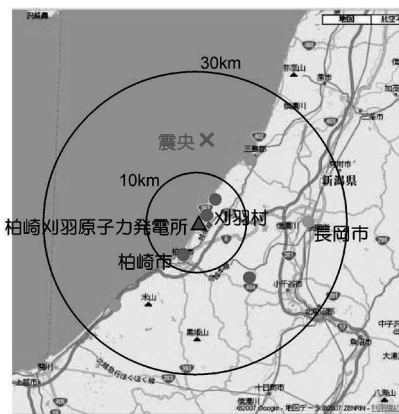


図 1 新潟県中越沖地震の震央と柏崎刈羽原子力発電所の位置

2. 柏崎刈羽原子力発電所の概要

柏崎刈羽原子力発電所は、新潟県柏崎市と刈羽郡刈羽村に跨る約 420 万 m² の敷地に立地する東京電力の原子力発電所である。1 号機から 7 号機までの合計出力は 8,212,000 kW で、世界最大の原子力発電所である。発電された電気は 50 万 V の送電線により群馬県の西群馬開閉所を經由し主に首都圏に送電されている。運転開始は 1 号機が 1985 年(柏崎市)で、2 号機(柏崎市)、5 号機(刈羽村)が 1990 年、3、4 号機(柏崎市)が 1993、1994 年、6、7 号機(刈羽村)が 1996、1997 年の順である(1 号機から 5 号機までは、沸騰水型原子炉(BWR; Boiling Water Reactor)であり、6、7 号機は、運転性および経済性に改良を加えた改良型沸騰水型軽水炉(ABWR: Advanced Boiling Water Reactor)である)。



図 2 柏崎刈羽原子力発電所敷地配置図

連絡先: 古谷 賢、〒945-8601 新潟県柏崎市青山 16 番地 46、0257-3-6114、
E-mail: masaru.furuya@tepcoco.jp

3. 各号機の状態と地震の観測結果

地震発生時、1号機、5号機及び6号機は定期検査中のため停止中。2号機は起動操作中。3号機、4号機及び7号機は定格運転中であつた(地震により原子炉自動停止)。

表1 地震時及び地震後のプラントの状況

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機	
地震発生時の状況	運転状況	定検中 (定検中期)	定検中 (起動中)	運転中	運転中	定検中 (定検末期)	運転中	
	自動停止	—	○	○	○	—	○	
	燃料の所在	全燃料取出中 (燃料プール)	伊内	伊内	伊内	伊内	伊内	伊内
	圧力容器上蓋	閉	閉	閉	閉	閉	閉	閉
	格納容器上蓋	閉	閉	閉	閉	閉	閉	閉
ウェルカパー	閉	閉	閉	閉	閉	閉	閉	
地震発生後の状況	運転状況	冷温停止中	冷温停止中	冷温停止中	冷温停止中	冷温停止中	冷温停止中	
	燃料プール水の溢れ	有	有	有	有	有	有	
	放射性物質の放出	—	—	—	—	—	ケーブル貫通部経路で燃料プール水が系外へ放出	タービン軸封部から排気蒸気へ放出
	火災と主な漏れ	原子炉建屋外周部に漏れ水流入 2,000m ³	—	所内変圧器火災	タービン建屋漏れ水流入 24m ³	—	—	—

※：スロッシング起因による。

柏崎刈羽原子力発電所の地震計の配置図を図3に示す。各号機の原子炉基板上の加速度時刻歴波形を図4に示す。全号機で顕著なパルス派が発生しており、特に荒浜川で時刻歴波形の後半に大振幅のパルスがみられる。一方、大湊側では時刻歴波形後半に荒浜川のような大振幅のパルスは確認されていない。

原子炉建屋基礎基板上で観測された最大加速度及び設計時の最大加速度応答を表2、3に示す。原子炉建屋基礎基板上での最大加速度の中で最大のものは1号機東西方向で680galである。なお、加速度波形については記録の主要動を含む50秒間を標記している。

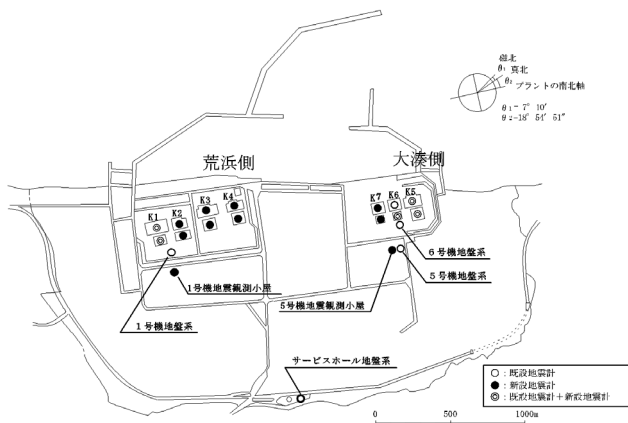


図3 発電所構内地震計の配置図

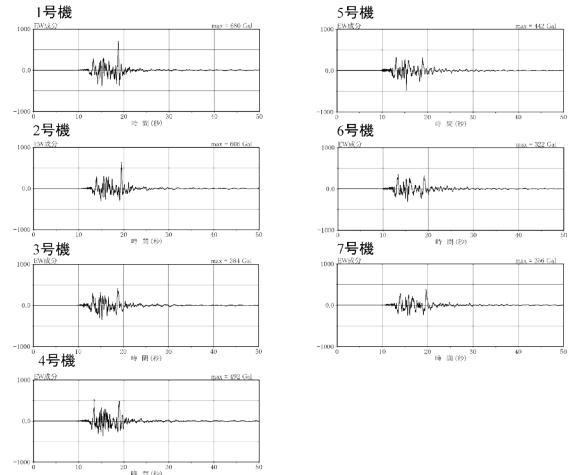


図4 各号機の原子炉基板上の加速度時刻歴波形

表2 観測された加速度値 (単位：ガル)

観測値		南北方向	東西方向	上下方向
1号機	最下階 (B5F)	311	680	408
2号機	最下階 (B5F)	304	606	282
3号機	最下階 (B5F)	308	384	311
4号機	最下階 (B5F)	310	492	337
5号機	最下階 (B4F)	277	442	205
6号機	最下階 (B3F)	271	322	488
7号機	最下階 (B3F)	267	356	355

【スクラム設定値】 水平方向120ガル、上下方向100ガル

表3 設計時の加速度応答値

観測値		南北方向	東西方向	上下方向
1号機	最下階 (B5F)	274	273	(235)
2号機	最下階 (B5F)	167	167	(235)
3号機	最下階 (B5F)	192	193	(235)
4号機	最下階 (B5F)	193	194	(235)
5号機	最下階 (B4F)	249	254	(235)
6号機	最下階 (B3F)	263	263	(235)
7号機	最下階 (B3F)	263	263	(235)

※上下方向については、()内の値を静的設計で用いている

4. 地震による損傷事例

地震後の設備点検においては、表4に示す設備の損傷等が確認された。

表4 地震による設備の損傷状況

重要度分類	主な対象設備	耐震設計	目視点検で確認された主な損傷等
Aa	Aクラスのうち特に重要なもの 原子炉圧力容器 原子炉格納容器 制御棒、制御棒駆動機構 残留熱除去系	基準地震動S2	なし
A	操業員により放射性物質を外部に放出する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの、並びにこれらの事故発生時に外部に放出される放射性物質による影響を減らせるために必要なものも含めて、その影響、効果の大きいもの 非常用炉心冷却系 炉内滞留物 原子炉建屋 ほう酸水注入系	基準地震動S1又は建築基準法の倍の地震力のいずれか大きい方	なし
B	上記においてその影響、効果が比較的小さいもの タービン設備 廃棄物処理系 原子炉冷却材浄化系	建築基準法の1.5倍の地震力	原子炉天井クレーン駆動軸の損傷(KK-6) (クレーン落下防止機能は維持)
C	A、Bクラス以外であって一般産業と同等の安全性を保持すればよいもの 主発電機 変圧器 タービン補機冷却系 洗濯機廃処理系	建築基準法の地震力	所内変圧器の火災(KK-3) 変圧器貯留地の沈下、スレ(KK-1, 2, 4, 7) 主排気筒に接続されるダクトのスレ(KK-1~5)
その他	----	----	事務本館のガラス破損、飲料水タンク濡れ

耐震重要度Sクラス機器に損傷は確認されなかった。耐震重要度Bクラス機器については一部機器に地震の加速度による軽微な損傷に加えて屋外設備に軽微な損傷が確認された。耐震重要度Cクラスの機器については、建屋間を接続する又は建屋外で変位が生じた地盤に設置された機器で以下のような破損等が確認された。

- ・ 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2,000m³の水溜まりが確認された(図5)。
 - ・ 1~5号機：主排気筒に接続されているダクトでズレが発生した(図6)。
 - ・ 3号機所内変圧器の一次側接続母線部の変位に伴う短絡で火花が生じ、これにより火災が発生した(図7)。
- 上記損傷が確認された機器の共通点は、設置されている地盤で変位が生じたことであった。

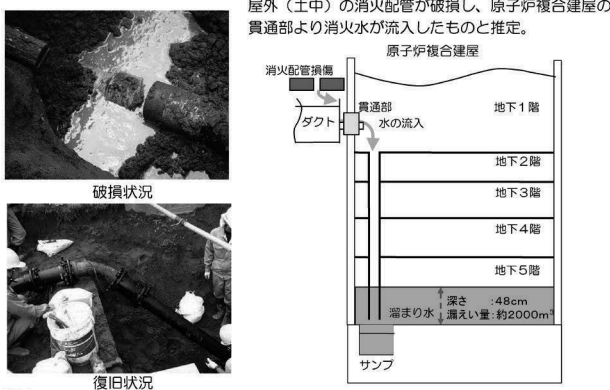
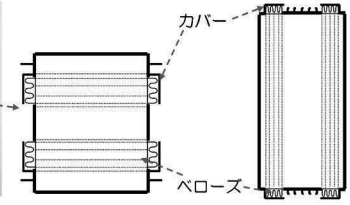
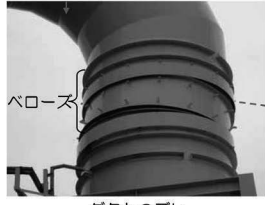


図5 K-1 消火系配管の損傷状況

K1 排気ダクト外観



ダクト ヘロース 主排気筒



ダクトのスレ

図6 K-1 主排気ダクトのずれ

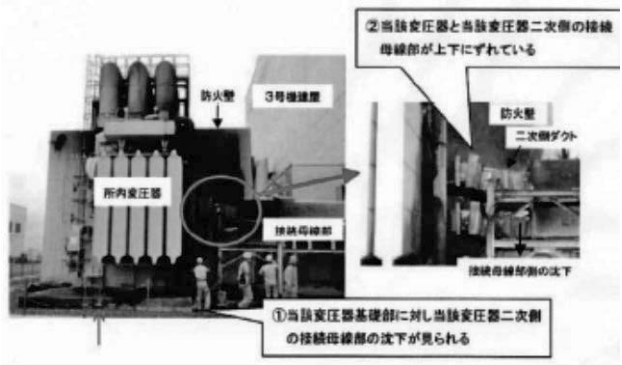


図7 K-3 所内変圧器での一次側母線短絡による火災

5. 中越沖地震を踏まえた設計上の工夫

地震による設備への影響については、その破損モードに基づき、表5に示す二通りに分類できる。

表5 地震による設備への影響の分類

地震の特性	設備への影響
地盤性状を変化	地盤変位を発生。
地震加速度を発生	慣性力(動的荷重)を発生。

中越沖地震では、観測された地震加速度が設計時の応答加速度を超えたものの、上記慣性力に対して安全機能の健全性が確保された。よって、本検討では、安全機能に対する影響が低い(耐震重要度の低い)機器や事後保全設備の地盤変位の対応について考察する。

各建物や構築物は、地震による放射性物質の放出を防止するため、原子力発電所耐震設計技術指針(表6)に基づき耐震設計上の観点から重要度の分類がなされ、耐震重要度分類に応じた設計荷重に対して適切な支持性能を有する地盤に設置されている(原子炉建屋、タービ

ン建屋は岩盤支持（直接基礎）に、変圧器基礎は岩盤支持（杭基礎）が設定されている）。

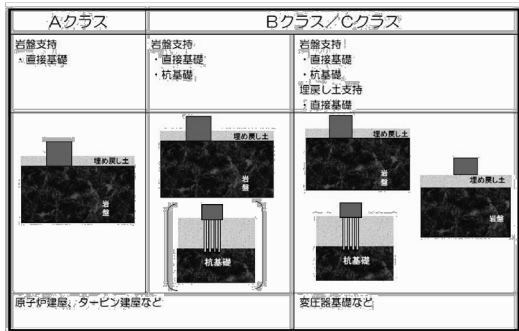


図-2.22 耐震設計上の重要度分類に応じた建物・構築物の支持形式

出典： 柏崎刈羽原子力発電所における中越沖地震による地盤変動とそのメカニズムについて、平成 20 年 2 月 27 日。http://www.jaif.or.jp/pdf/2008_11_Sakai.ja.pdf

図8 耐震重要度分類に応じた建物・構築物の支持形式

そして、耐震重要度の高い屋内機器は、それらが設置されている建屋（原子炉建屋、タービン建屋）の基礎が岩着されているため、地震による地盤変位が生じる可能性は極めて低いことから、地盤変位に特化した対応は不要と言える。

表6 旧原子力発電所耐震設計技術指針（抜粋）

- ① Sクラスの施設
 - i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」（軽水炉についての安全設計に関する審査指針において記載されている定義に同じ。）を構成する機器・配管系
 - ii) 使用済燃料を貯蔵するための施設
 - iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設
 - iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
 - v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
 - vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設
 - vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設で上記vi) 以外の施設
- ② Bクラスの施設
 - i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵しうる施設
 - ii) 放射性廃棄物を内蔵している施設。ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式により、その破損による公衆に与える放射線の影響が周辺監視区域外における年間

- の線量限度に比べ十分小さいものは除く。
 - iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設
 - iv) 使用済燃料を冷却するための施設
 - v) 放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、Sクラスに属さない施設
- ③ Cクラスの施設
上記Sクラス、Bクラスに属さない施設

それに対して、屋外に設置している耐震重要度の低い設備については、地盤の変位による機器の異常な変位発生の可能性が高いと考えられる。これらの設備については、安全機能に対する影響は低いため、地震時は自身の損傷を許容する事後保全設備として管理することが可能である。しかしながら、耐震重要度が高い機器への波及的影響等を防止する観点から、設置状況に応じて変位防止対策又は変位緩和対策が、設備保全上、最適な防護戦略と言える。

変位防止対策としては、変圧器ダクトや主排気筒ダクトのように基礎部の一体化が設備保全上有効である（変圧器ダクトに関する例を図9に示す）。

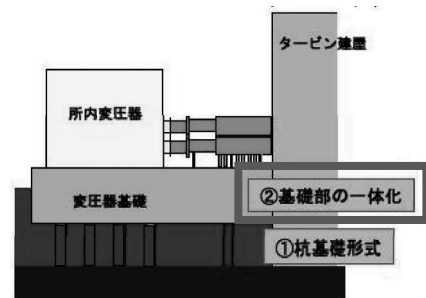


図9 基礎部の一体化イメージ（変圧器ダクトに関する対策例）

変位影響緩和対策としては、屋外消火系配管のように地中埋設を地上化するとともに固定箇所数の最小化や配管長手方向の自由度を確保するような固定法の採用（図 10）、タンク配管のフレキシブルジョイント方式のように地盤変位を吸収する機器の接続方式の採用（図 11）、設置場所の不等沈下に対して電路確保の耐性が高い合成樹脂製多孔管による屋外ケーブルの敷設（図 12）といった機器の特性に応じた対策が保全上有効である。



図 10 屋外消火栓配管の地上化



図 11 タンク配管のフレキシブルジョイント方式

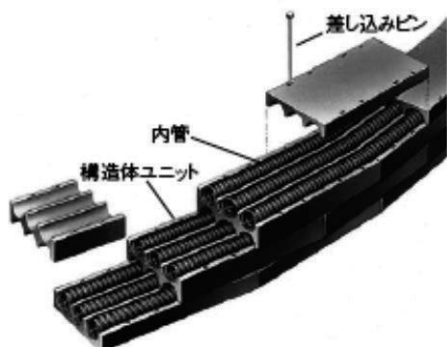


図 12 合成樹脂製多孔管を用いたケーブル敷設

5. まとめ

新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の損傷事例は、原子炉施設の直下に活断層が存在する等、原子炉施設の地盤が地表面に変位を発生させる可能性が認められたとしても、原子炉施設の安全機能に影響を与えないように変位防止対策又は変位緩和対策を講じることによって合理的に原子炉施設の安全を確保することが可能であることを示唆している。

参考文献

- [1] 社団法人日本技術士会 柏崎刈羽原子力発電所復旧状況調査チーム、“東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所の概要と耐震設計の考え方”、日本技術士会、2008
- [2] 社団法人日本技術士会 柏崎刈羽原子力発電所復旧状況調査チーム、“土木構築物”、日本技術士会、2008
- [3] 新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る点検・評価に関する報告書（案）（機器レベルの点検・評価報告）、東京電力(株)、2009
- [4] “新潟県中越沖地震の影響について”、日本技術士会、2008
- [5] 柏崎刈羽原子力発電所1号機 新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る点検・評価に関する報告書（案）（機器レベルの点検・評価報告）、東京電力株式会社、2009
- [6] “新潟県中越沖地震後の影響について”、東京電力株式会社、2007
- [7] “耐震裕度向上対策の取り組み状況について”、電気事業連合会、2013

