

第 6 回 定 期 研 究 会

平成19年度 第6回定期研究会 議事録

日時 : 平成20年2月20日(水) 16:00~17:30

場所 : 愛知工業大学 本山キャンパス 3階 大講義室

出席者: 久保, 宇佐美, 小塩, 渡邊(名城大), 青木, 鈴木(愛工大), 葛, 石川(名大), 中野(愛知県), 森谷(海洋架橋), 神田(八千代E), 青嵐(中部復権C), 坂井田(帝国C), 藤澤(新三重), 古田土(トピー), 織田(瀧上), 山田, 神頭, 水野(日車)

19名(敬称略)

1. 定期研究会(鈴木研究会担当幹事)

講演題目 「新潟県中越沖地震から学ぶ原子力発電所の耐震安全性の課題」

講演者 愛知工業大学 入倉 孝次郎 客員教授

講演内容

新潟県中越沖地震を受けて、今後の原子力発電所の耐震安全性を確保するために、適切な基準地震動評価など、検討すべき事項について講演して頂いた。

新潟県中越沖地震(MJMA6.8)は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が震度7の強震動の直撃を受けた。原子炉の基礎版で記録された地震動は耐震設計のために想定された地震動のレベルを最大で約2.5倍も上回るものであった。今回の地震は原子力発電所の耐震安全性に大きな問題を投げかけた。新潟県中越沖地震により学ぶことができた、適切な基準地震動評価のために考慮すべきことは以下の通りである。

- ・個別サイトに影響を及ぼす地震の発生地域における地形・地質調査の徹底と検討用地震の選定に関して「ひずみ集中帯」など地震に関わる構造帯の地域的特性の考慮。
- ・震源を特定して策定された地震動評価のための活断層に関する調査方法の確立と地震動評価の高精度化。
- ・中越沖地震は気象庁マグニチュード6.8で、この程度の規模の震源断層が事前に特定できるかどうかについて地震に関わる構造帯の地域的特性と関連した検討が必要とされている。

地震動は動的解析時の構造物の挙動特性に大きな影響を与えるものであるため、講演者の関心は高く非常に活発な質疑が行われた。

2. 名城大学「高精度制震実験・解析研究センター」開所記念講演会の案内を宇佐美先生が行った。

以上//

講師

愛知工業大学 地域防災研究センター 客員教授
入倉 孝次郎

題目： 「新潟県中越沖地震から学ぶ原子力発電所の耐震安全性の課題」

「講演要旨」

2007年7月16日の新潟県中越沖地震(MJMA6.8)は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が震度7の強震動の直撃を受けた。原子炉の基礎版で記録された地震動は耐震設計のために想定された地震動のレベルを最大で約2.5倍も上回るものであった。原子力発電所の被害については、変圧器の火災、貯蔵庫内のドラム缶の転倒、極微量ではあるが放射性物質の放出などはあったが、現在のところ、原子炉や原子炉建屋など安全上重要な設備には目立った損傷はないと報告されている。このように大きな地震が原子力発電所の近くで起こったのは国内のみならず国際的にも初めてのケースで、日本の原子力発電所のみならず、地震国にある各国の原子力発電所の耐震安全性に大きな問題を投げかけた。今回の地震を受けて、今後の原子力発電所の耐震安全性を確保するために検討すべきことは何かについて議論したい。

新潟県中越沖地震から学ぶ原子力発電所の耐震安全性の課題 —適切な基準地震動評価のために考慮すべきこと—

入倉 孝次郎

●愛知工業大学

1. はじめに

2007年7月16日の新潟県中越沖地震（気象庁マグニチュード6.8）は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が震度7の強震動の直撃を受けた。原子炉の基礎版で記録された地震動は耐震設計のために想定された地震動のレベルを最大で約2.5倍も上回るものであった。原子力発電所の被害については、変圧器の火災、貯蔵庫内のドラム缶の転倒、極微量ではあるが放射性物質の放出などはあったが、現在のところ、原子炉や原子炉建屋など安全上重要な設備には目立った損傷はないと報告されている¹⁾。このように大きな地震が原子力発電所の近くで起こったのは国内のみならず国際的にも初めてのケースで、日本の原子力発電所のみならず、地震国にある各国の原子力発電所の耐震安全性に大きな問題を投げかけた。

一昨年9月の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂を受けて、原子力安全委員会は、行政庁から原子力事業者に対して既設も含めて原子力施設の耐震安全性の評価の実施と、その結果の速やかな報告を指示した。原子力安全・保安院は、原子力施設について新耐震指針に照らした耐震安全性の評価（バックチェック）を原子力事業者に要請した。それを受けて原子力事業者は、耐震安全性の評価の実施計画書を行政庁に提出し、既設原発の耐震安全性の評価のために地形・地質調査を実施するとともに、基準地震動の評価を準備している最中にこの地震は起こった。

この地震により、柏崎刈羽原子力発電所で記録された地震動が設計用に想定された地震動レベルを超えただけでなく、この地震に関連した考えられる震源断層は1-7号機の設置許可時には活断層として評価対象になっていなかった、など安全審査に関わる種々の問題が露呈した。これらの事実、柏崎刈羽原子力発電所のみならず他の原子力発電所に対しても、新指針に対応した耐震安全性の評価のための地形・地質調査や基準地震動の評価に関する計画の見直しを迫るものであった。

改訂された耐震審査指針は①最新の手法に用いた詳細な活断層調査、②最新の知見に基づく断層モデルによる地震動評価、③震源を特定せず策定する地震動の

策定、などが規定されており、今回のような地震に対しても断層モデルによる基準地震動の評価とそれに基づく建屋・機器の耐震安全性の評価が要求されている。今回の地震は新耐震指針の考え方の重要性を改めて示すものといえる。しかしながら、原子力事業者が指針の改訂を受けて耐震安全性の確認のために作成した計画書そのものが今回の地震の地震動やそれに基づく建物・建築物の健全性の確認に適したものかどうか改めて吟味が必要とされている。

2. 中越沖地震の概要 —震源メカニズムと強震動—

2007年新潟県中越沖地震は7月16日に新潟県上中越沖の深さ約10 kmで起こった。この地震の気象庁マグニチュードは6.8、モーメントマグニチュードは6.6（防災科研, 2007）、震源域に近い新潟県刈羽村や柏崎市において震度6強、柏崎刈羽原発の敷地では震度7が記録された。この地震が発生した地域は、プレート境界と考えられている日本海東縁部の延長に位置し、これまでも地質構造調査により活褶曲の分布する歪み集中帯であること（岡村, 2002）²⁾、GPSによる地殻変動調査でも日本海西岸・新潟から南西方向に延びる歪み集中帯であることが確認されていた（鷺谷, 2007）³⁾。この歪み集中帯では歴史的に繰り返し大地震が起こっていることが指摘されていた。

ところが、この地震の発生直後、その発震機構は近地および遠地の地震記録の解析から北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であることはすぐに明らかになったが、断層面が南東傾斜か北西傾斜かはなかなか特定できなかった。それは、今回の地震の震源が日本海の沿岸域で、地震観測や地殻変動観測が震源域の東側に遍在していたため、余震の決定精度が悪く、余震分布から震源断層面が南東傾斜か北西傾斜かの決定が困難であったことによる。また、GPSやSARなどの地殻変動データからもユニークな断層面解の決定が困難であった。これは日本の地震調査研究体制の弱点を露にしている。

科学技術振興調整費「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」（東京大学地震研究所など）で海底地震計による余震観測により再決定された余震分布の結果は

震源断層が南東傾斜であった可能性を強く示唆した⁴⁾。地震調査委員会は、本年1月に臨時の海底および陸上地震観測に基づく震源分布、および震源分布を参照した地殻変動解析結果から「この地震は大局的には南東傾斜の逆断層運動により発生し、震源域の北東部では北西傾斜の断層も活動した」との見解をまとめた。震源域の北東部では地震発生後約5カ月でようやくこの問題の決着がついたことになる。

地表で観測された地震動の最大加速度は経験的距離減衰式(司・翠川, 1999)⁶⁾にはほぼ従っている。しかしながら、震源域近くの柏崎刈羽原発での地表の最大加速度は経験式に比べて顕著に大きい(図1)。柏崎刈羽原発の岩盤地中で得られた最大加速度も岩盤上で観測された地震動の最大加速度の経験的距離減衰式(Fukushima and Tanaka, 1989)⁷⁾と比べて極めて大きい。

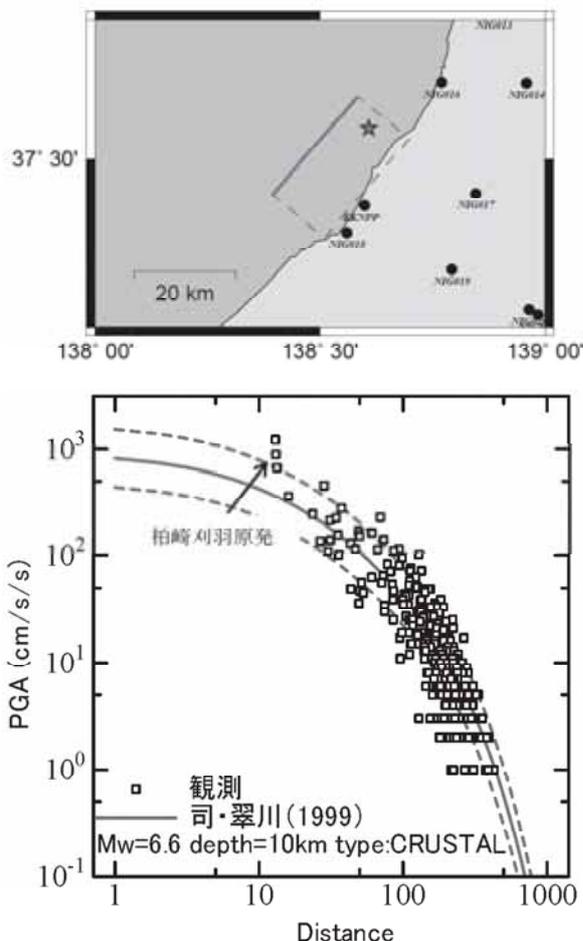


図1 上: 想定した南東傾斜の震源断層モデル(堀川,2007)⁹⁾。下: 最大加速度の距離減衰式。

柏崎刈羽原発での強震動が大きい原因としては、①震源断層における破壊の放射特性・指向性効果など、

②敷地近傍の地盤の増幅効果、③フォーカシングなど伝播経路の性質、などが考えられる。

上の①であげられる震源特性については、震源断層として北西傾斜を仮定すると、柏崎刈羽サイトは破壊の進行方向に位置することになり、大きな強震動はデレクティビティ効果の可能性が高いと考えられるが、震源断層が南東傾斜とすると、デレクティビティ効果の影響は小さい。本研究では、南東傾斜の震源断層を想定して、経験的グリーン関数を用いて断層モデルを設定して震源近傍域での観測記録と合成波形との比較により最適震源モデルを構築し、なぜ柏崎刈羽原発における大きな強震動が生成されたかの原因を検討する。この方法は、経験的グリーン関数として用いる余震記録が本震の地震動とほぼ同じ②の地盤特性と③の伝播特性を持っているので、①の震源特性の議論に適している。

縦横・引間(2007)⁸⁾は、遠地実体波および強震動の記録を用いた波形インバージョンにより、南東傾斜の断層面を設定した震源断層モデルが観測記録を最もよく説明するとの見解を発表している。さらに、彼らは柏崎刈羽原発の原子炉基礎版上の波形記録にみられる3つのパルス波が波形インバージョンで得られた3つのアスペリティに対応していると結論している。堀川(2007)⁹⁾も、強震記録を用いた波形インバージョンを行い、南東傾斜の2枚の断層面を想定したとき残差最小の解が得られることを示した。

これらの解析では、強震動記録として0.5Hz以下の低周波成分の速度波形あるいは変位波形を用いて、理論波形との比較がなされている。ここでは、経験的グリーン関数法を用いることにより、0.1~20Hzの広周波数帯域の強震動のための震源断層のモデル化が可能となった。原子力発電所の耐震安全評価のためにはこのような広周波数帯域の地震動の評価が不可欠である。

震源断層面は海底地震計による観測結果を用いて再決定された余震分布から走向方向(N37° E)および傾斜角(30°)の1枚の断層面を仮定。震源モデルとしては3つのアスペリティからなる特性化震源モデルを仮定し、設定されたアスペリティの位置に対応してそれぞれ適切な余震記録をグリーン関数として用いた。最適モデルとして得られた震源モデルが図2に、合成された強震動と観測記録の比較が図3に示される(入倉・他, 2007)¹⁰⁾。合成された加速度、速度、変位とも観測記録によく一致している。計算に用いた各アスペリティにおける応力降下量は約20MPaで、これまでのレシピに基づいて設定された応力降下量よりもやや大きい。このモデルの有効性は離散化波数法(Bouchon,

1981) ¹¹⁾を用いた理論的グリーン関数を用いて計算でも確かめられた。

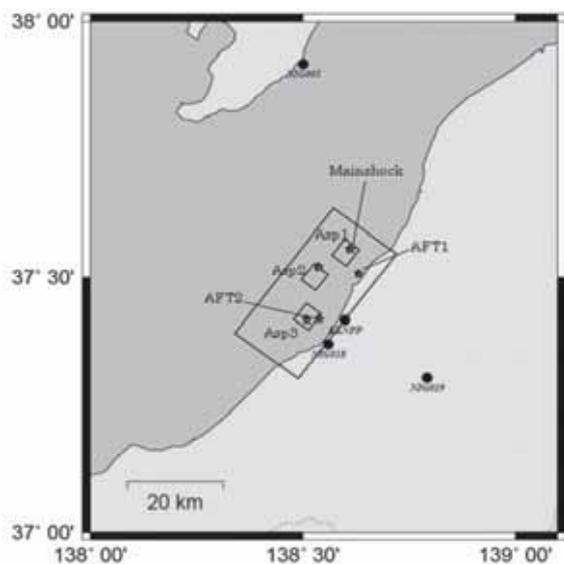


図2 経験的グリーン関数法を用いて評価された震源断層モデル。3つのアスペリティからなる特性化震源モデルを設定。

柏崎刈羽原発の1号機の基礎版で顕著に大きな強震動が得られた原因を検討するために、アスペリティ1およびアスペリティ3から柏崎刈羽原発1号機へのS波の放射特性を評価したところ、1号機がアスペリティ3の放射特性の腹の方向に位置していることが分かった(図4)。ここでの放射特性の計算は完全無限弾性媒質を仮定したものであるが、より現実に近い平行多層構造媒質を考慮しても同様の結果が得られることが確かめられた。

これらの解析により次のことが明らかになった。この地震の震源断層は3つのアスペリティ(Asp 1、Asp 2、Asp 3)を有していること、柏崎刈羽原発で観測された3つのパルス波は3つのアスペリティから地震動に対応している。柏崎刈羽原発で想定以上に大きな強震動に襲われた原因は、①柏崎刈羽の沖合に強い地震動を生成するアスペリティ(Asp 3)があり、②柏崎刈羽はそのアスペリティから発せられるS波の放射特性が最大となる方向にあたること、③そのアスペリティから発せられた地震波が伝播経路でのフォーカシングと厚い堆積層により大きく増幅され、柏崎刈羽で強いパルス波が生成されたこと、にあると考えられる。

3. 新潟県中越沖地震から学ぶべきこと

今回の地震により、原子炉建屋基礎版等の観測地震動は耐震設計のために想定された地震動を2.5倍も上回った。このような地震動による原子力発電所への影響について徹底した調査および今後の耐震安全性評価の在り方について検討が必要とされる。今回の地震から得られる知見を整理し、他の原子力発電所に反映すべき事項を明確にする必要がある。今回の地震から学んで基準地震動の評価についての教訓として以下のものがあげられる。

(1) 個別サイトに影響を及ぼす地震の発生地域における地形・地質調査の徹底と検討用地震の選定に関して「ひずみ集中帯」など地震に関わる構造帯の地域的特性の考慮。

日本の原子力発電所は海岸に立地しており、海域から陸域にかけてシームレスな地形・地質、地下構造の調査が必要とされる。今回の地震に関連した断層は海底地震計により再決定された余震の分布(南東傾斜)と産総研の調査による海底断層が対応していることから、ようやく位置と形状が特定された。今回の活断層の見逃しは単に調査方法の問題だけでなく安全審査の在り方にも問題がある。新指針を踏まえた地質・地盤に関する安全審査の手引きの早急な改訂が必要。

(2) 震源を特定して策定する地震動評価のための活断層の調査方法の確立と地震動評価の高精度化。

中越沖地震を引き起こした震源断層は東京電力が審査時点で提出したF-B断層に対応することが分かってきた。東京電力の報告によると、建設時点では海域にF-B断層の存在は確認していたが、この断層の活動は50000年以前ということで評価対象となる活断層ではない判断された。その後褶曲の形態から活断層の形態が推定可能(岡村, 2000) ¹²⁾との新知見が得られ、その考えに基づいて再評価の結果、この断層は長さ20 kmの活断層と認定されていた。しかしながら、この活断層に対する地震動は旧指針のS2を上回らないと判断された。これは、活断層情報に基づく震源断層に関するモデル化が適切でないため、地震動が過小評価されたことを如実に示している。

新指針に規定されているように、活断層に関する詳細調査(海底地質・地形調査、音波探査、重力探査、大規模反射法調査など)に基づき、巨視的・微視的断層パラメータとそれらのばらつき(不確かさ)を考慮して震源断層モデルの推定、および震源域から敷地までの波動伝播特性についての経験的・理論的評価を行って、解放基盤および基礎版上の地震動の評価を実施し、適切な基準地震動の策定がなされる必要がある。

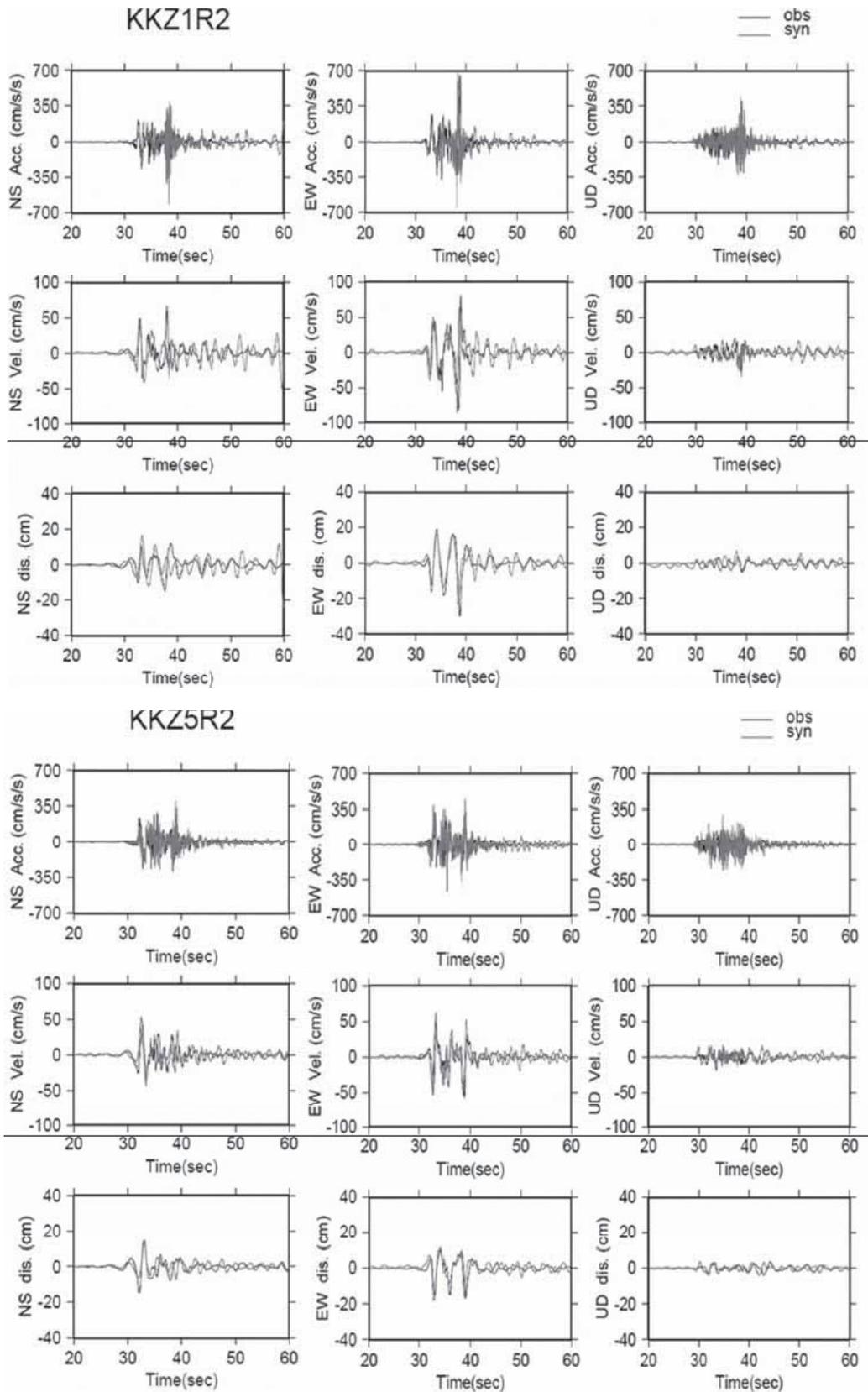


図3 観測記録(黒)と合成された強震動(灰)との比較。上はKKZ1R2(柏崎刈羽原発1号機基礎版)、下はKKZ5R2(柏崎刈羽原発5号機基礎版)。

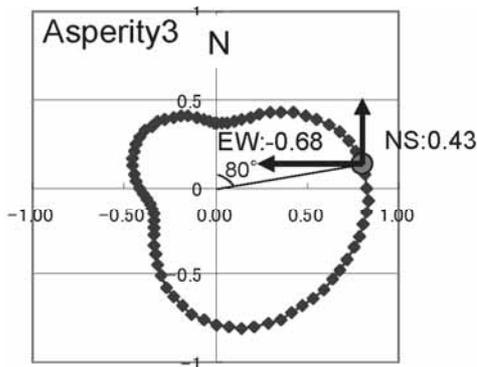


図4 アスペリティ3に点震源を置いた場合に対する柏崎刈羽原発へのS波の放射特性。完全無限弾性媒質を仮定し、点震源解としては走向 37° 、傾斜角 30° 、すべり角は 90° に設定。柏崎刈羽は放射特性の腹方向に位置。

(3) 震源を特定せず策定する地震動との関係

中越沖地震は気象庁マグニチュード6.8で、この程度の規模の地震の震源断層が事前に特定できるかどうかについて地震に関わる構造帯の地域的特性と関連した検討が必要とされている。また、たとえ震源断層が特定されたとしても、今回の地震により原子炉建屋基礎版上で記録された地震動が予測可能であったかどうかは、今後の詳細な調査が必要とされる。柏崎刈羽発電所が揺れやすい地盤上に位置している可能性、および強震動の生成に大きな影響を及ぼすアスペリティに関連するパラメータの事前評価の可能性、などについて、今後さらなる詳細調査が必要。

当面の措置として、他の原子力発電所等の耐震安全性の評価のために、原子炉建屋基礎版上での観測記録を基づいて、個別の敷地の地盤特性、建屋や機器などの機能や実耐力、振動特性の実態なども考慮して、適切な基準地震動の策定がなされる必要がある。

謝辞

本報告では独立行政法人防災科学研究所のK-NETおよびKik-Netによる強震動観測記録を使用させていただきました。2007年新潟県中越沖地震に関する調査研究については各関係機関が文部科学省地震調査委員会で発表した資料を使用させていただきました。関係者および関係者の皆様に深く感謝します。

参考文献

1) International Atomic Energy Agency: Preliminary findings and lessons learned from the the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP, Mission Report Vol.1, Engineering Safety Expert Mission, 2007.

2) 岡村行信：第7章日本海東縁の歪み集中帯，大竹ほか編集，「日本海東縁の活断層とテクトニクス」，111-121，東京大学出版会，2002。

3) 鷲谷威：中部・東北日本におけるプレート内歪み集中帯—その構造、変形と地学的意義—，月刊地球，29，376-382，2007。

4) 東京大学地震研究所・他：「2007年新潟県中越沖地震に関する総合調査」海底地震観測及び陸上臨時観測による余震観測，第175回地震調査委員会（2007年11月12日）東京大学地震研究所資料，2007。

5) 地震調査委員会：平成19年(2007)新潟県中越沖地震の評価（主に断層面に関する評価）
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jan_chuetsu_oki/index.htm。

6) 司 宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，523，pp.63-70,1999。

7) FUKUSHIMA, Yoshimitsu and Teiji TANAKA: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80,757-783, 1990。

8) 引間和人・額額一起：遠地実体波と強震波形から推定される2007年新潟県中越沖地震の震源過程，日本地震学会2007年秋季大会ポスター発表，
<http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/chuetsuoki/source/index.html>，2007。

9) 堀川晴央：波形インバージョンによる中越沖地震の震源モデルの推定(2)：2枚の断層面を仮定した場合，第175回地震調査委員会（2007年11月12日）産業技術総合研究所資料，2007。

10) 入倉孝次郎・香川敬生・宮腰研・倉橋奨：2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか？，
http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/cyuetsu_071228.pdf，2007。

11) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered Media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 959-971, 1981。

12) 岡村行信：音波探査プロファイルに基づいた海底活断層の認定—fault related, growth strata及びgrowth triangleの適用—，地質調査所月報 51, 59-77, (地質調査所)，2000。