解説

原子力発電所の耐震性能を知る 地震発生後の電力安定供給のために

原子力安全推進協会 落合 兼寛

わが国の原子力発電所は、全く特性の異なる2つの大地震、2007年新潟県中越沖地震と2011年東北地方太平洋沖地震にも耐えて、その安全関連施設のみならず、発電所全体の地震の揺れに対する耐性が優れているとの知見が得られている。本稿は、これらの経験に基づく知見を概括し、あわせて地震発生後の電力安定供給のための施策を提案するものである。

I. はじめに

2011年3月11日に発生した巨大地震による津波は869年の貞観地震の再来とも報じられたが、貞観地震の後には、878年に関東地方、880年に中国地方、881年に京都と地震が続き、東南海地震に相当する仁和地震が887年に発生している。日本全体が地震の活動期に入ったとの指摘もあるなかで、2020年の東京オリンピック開催準備では、人間が制御できない自然現象、例えば東南海地震によって日本の産業活動が一時的にでも停滞することのリスクも想定する必要があるだろう。

3月11日の東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方の太平洋沿岸の多くの発電所が地震動と津波によって発電を停止したが、幸いにして本震直後の電力網が不安定となる広域停電は免れ、被災地域も徐々に電力供給が回復していった。その陰には、多くの関係技術者の献身的な努力に加え、2007年の中越沖地震で原子炉が自動停止した東京電力柏崎刈羽原子力発電所の4基(電気出力計4,912MWe)が復旧しており、全出力運転を続けてくれていたことも大きいと考えている。

原子力発電所はどの程度の耐震性を有するのであるか？地震時安全性は多くの地震を経験して立証できたが、発電能力はあるのだろうか？大地震発生後にも安定した電力を供給して世の中の期待に応えるためには、今何をすべきであろうか？考えてみたい。

II. 原子力発電所の耐震性の実力は？

1. 地震動の強さを表す指標

地震荷重により応力評価して構造詳細を決定する耐震設計では、質量に掛けることで地震荷重を算出する加速

度値が重視されるが、加速度、特に地震動の加速度最大値は必ずしも設備の損傷に結びつかないことがよく知られている。このため、地震被害の視点から地震動の強さを表す、加速度に代わる指標(DIP: Damage Indicating Parameter)として古くから種々の指標が提案されている。最も一般に馴染みの深いのは震度階であり、地震による物の壊れ方は国によって異なることから、各国でその国情に沿った震度階が使用されている(日本では地震計の観測記録から計算される計測震度をもとに、気象庁震度階が地震直後に公表される)。また、特に原子力発電の分野では、標準CAV(Standardized Cumulative Absolute Velocity)という指標が米国の地震動評価に用いられている。それらの指標の定義式を見ると、震度階は下記に示すピークパラメータに、また、標準CAVは積分パラメータに位置づけられ、この両者を組み合わせることにより、直下地震や巨大地震の地震動特性を加速度最大値よりも適切に評価することが出来るようになる。

【指標の分類例と地震被害のモード】

○ピークパラメータ

初通過破壊(構造物の応答が最初に破壊レベルを越えたときに生じる破壊；延性破壊、塑性崩壊、座屈など)に対する指標

○積分パラメータ

累積疲労破壊(累積値があるレベルに達したときに生じる破壊；疲労破壊など)に対する指標

ここで、計測震度(I_{JMA})は次式にあるように、その算出過程で対数をとることから、耐震性の高い施設の損傷が予想される領域では値が飽和する傾向があり、DIPとしては、式中の A_{JMA} を用いることが国際原子力機関(IAEA)の国際耐震安全センター(ISSC)の検討で提案されている。

$$I_{JMA} = 2 \log A_{JMA} + 0.94$$

Capacity of NPPs against Earthquake & Proposals to Prepare for Post-Earthquake Electric Supply: Kanehiro OCHIAI.

(2013年10月31日 受理)

この A_{JMA} は加速度の単位を有する指標であるが、観測された地動加速度の高振動数域 (ほぼ 10Hz 以上) と低振動数域 (0.5Hz 以下) にフィルターをかけ、さらに加速度の継続時間や速度値についても考慮した、いわば設備の損傷に配慮した有効加速度としての性格を有している。

一方、標準 CAV は簡易的には次式で定義されるように、加速度の絶対値を積分したものであり、地震動の振動波形の速度を足し合わせた (すなわち、エネルギーに關係する) 指標と考えられている。

$$CAV = \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} |a(t)| dt$$

ここで、 $a(t)$: 加速度時刻歴

t_i : 0.025G (G: 重力の加速度) を超える時間幅 (1 秒間刻み) の総数 n について足し合わせる

2. 原子力発電所で観測された地震動の特色

原子力発電所で観測された 3 月 11 日の巨大地震本震の地震動波形は、複数の震源位置とその規模、発生の時刻差、観測点の地盤条件などによって複雑に変化し、第 1 図に示すようなものとなっている。図には新潟県中越沖地震の観測波形も比較のために記載しているが、この地震はマグニチュードが 6.8 の規模であることから地震動の継続時間は短いが、柏崎刈羽原子力発電所では図に

示すようなパルス状の波形が観測されている。

第 1 図にはこれらの地震動波形から計算した DIP を表示しており、最大加速度値では見えなかった地震動の破壊への影響が見えてくる。すなわち、新潟県中越沖地震ではピークパラメータの A_{JMA} が際立って大きく、初通過破壊への配慮が必要である。このような比較的継続時間 (パルス幅) の長い加速度パルスは 1995 年の阪神淡路大震災でも観測され、構造物の破壊につながったとされている。一方、巨大地震では主要動の継続時間が長いことから積分パラメータの標準 CAV が特徴的に大きく、累積疲労破壊が特色となる可能性を示している。東日本大震災では体育館などの吊り天井の落下が多数報告されており、継続時間の長い主要動による破壊の特徴が現れていると思われる。

3. 原子力発電所の地震被害と地震動

2005 年の宮城県沖地震以降、5 回に及ぶ「設計基準を超えた」と称された地震動を 26 基の BWR プラントが経験したが、安全関連設備の損傷は報告されていない。また、耐震クラス B、C (原子力発電所設備の耐震クラスは第 1 表参照) の設備の損傷も極めて限定的なものであった。

これまでに原子力発電所で観測された地震動を A_{JMA} と標準 CAV で整理すると、第 2 図に示すようにそれらの地震動の特徴が明確に示される。また、図に中実のマーカーで示している観測点では、例えば擦り傷のよう

図の補足説明

図には観測された加速度値の時間変化、「時刻歴加速度波形」を示している。特に「初通過破壊」については、加速度ピークの形状が影響していると考えられることから、最大加速度値が観測された部分の 3 秒間のみを拡大したものが右側の図であり、各観測波形によって形状が異なる様子を見ることができる。
(注: 図中 Gal は cm/s^2 を示す加速度の単位で、例えば、200Gal は重力の加速度 (G) の 0.2 倍にほぼ相当している)。

原子力発電プラント 原子炉建屋基礎版上	最大加速度 3 方向合成値	気象庁震度階 (計測震度)	DIP	
			A_{JMA}	標準 CAV
女川 1 号機	637Gal	6 弱 (5.6)	225Gal	6.9G-sec
福島第一 6 号機	460	6 弱 (5.7)	266	6.4
福島第二 1 号機	290	6 弱 (5.5)	202	5.4
東海第二	262	5 強 (5.3)	157	2.7
柏崎刈羽 1 号機	685	6 強 (6.0)	346	1.7

表の補足説明

最大加速度値は女川原子力発電所が福島第一原子力発電所より大きい、有効加速度は逆転していることが分かる。

第 1 図 地震動時刻歴波形 (例) の最大加速度値と DIP

第2図 観測記録のDIPとB, Cクラス設備の損傷分布

な軽微なものを含めて、耐震クラスB, Cの設備の何らかの損傷が電力会社の詳細な点検によって報告されている。図には観測点でのDIPのしきい値となるような損傷事例も示している。

図では、 A_{JMA} が200 Gal程度以上で軽微な損傷を含めた何らかの損傷が見られる。この A_{JMA} 値は耐震クラスCの静的震度に近い値であり興味深い。新潟県中越沖地震では柏崎刈羽原子力発電所の屋外に設置された変圧器(耐震クラスC)の基礎ボルトがせん断破壊しており、また、東北地方太平洋沖地震では女川原子力発電所のタービン建屋に設置された、同じく耐震クラスCの高圧電源盤内の吊り下げ設置型開閉器が短絡している。両地震に共通的には屋外設置の薄肉円筒型貯水タンクの座屈現象が発生しており、 A_{JMA} のしきい値が比較的小さいところにあることを示すと考えられる。これらはいずれも一般産業施設と類似した損傷形態であるが、地震動入力及び耐震設計内容が明確な設備の損傷データとして極めて貴重である。

4. 地震の揺れに弱い設備と強い設備

適切なDIPを選択して地震動の特性と構造物の損傷メカニズムを結びつけることにより、地震動に対して脆弱な設備と本質的に強い設備を選別することができるようになる。

発電能力に関して A_{JMA} のしきい値となっているのは

蒸気タービン発電機であり、設置位置(タービン架台上)で230Gal程度の有効加速度を受けるとタービン発電機のスラスト軸受の支持構造に変形(ズレ)が生じてタービンの動翼と静翼が接触する(これは低速タービンを使用する火力発電とも共通で、発電出力と設計内容にも依存すると考えられる)。このモードはタービン軸方向に大きな地震荷重を受けたときの初通過破壊であり、この対策を施すことによって発電能力のしきい値は大幅に向上する。一方、同じ初通過破壊に属する基礎ボルトの損傷は、東京電力が実施した確認試験¹⁾によれば、設計許容値の裕度が小さく、設計者が余裕を考慮して断面算定を行うことが重要であることを示している。事実、設計者は大きな余裕を考慮しており、第2図に示す事例でも、しきい値となる A_{JMA} 値は約510 Gal(震度階6強)となっている。

これまで地震の揺れに起因する溶接配管の損傷事例は極めて少なく、耐震技術者の間では、通常の溶接配管は地震の揺れでは損傷しないと考えられてきた。NUPEC/JNESが実施した大型振動台による実規模配管の終局強度試験²⁾では、設計限度の内圧を加えた口径約200mmの鋼製配管を大型振動台上に3次元に配置し、地震荷重で壊れやすくするために錘をつけ、サポートのエネルギー吸収を少なくするような工夫をして加振した結果、第3図に示す人工的な地震動波形(配管を壊すために共振するよう配慮したもの)を5回繰り返して、やっと配管のエルボ一部に貫通亀裂を生じさせることに成功している。

この4回目の加振完了時の標準CAV ($23.2 \times 4 =$ 約90 G-sec)と実際に発電所で観測された波形(例えば、第1図の福島第一原子力発電所6号機原子炉建屋基礎版上の値6.4G-secなど)を比較すると、多くの配管が設置された建物主要床面では10倍以上の耐震余裕を有していることが分かる。また、地震応答に重要な固有振動数の影響を考慮するため、エネルギースペクトルを比較する手法³⁾を適用してみると、第4図の通り4回の加振によって配管に加えられたエネルギー(破線で示す曲線の、配管固有周期0.26~0.28秒のエネルギー等価速度値)は、巨大地震時の観測値に比べて極めて大きく、仮に福島第一原子力発電所6号機原子炉建屋で最も揺れた屋根に類似の配管が設置されたとしても、8倍程度(下の階では約20倍程度)の耐震余裕があったことになる。

第3図 配管終局耐力試験時の振動台上加速度波形 (JNES提供)

第4図 エネルギースペクトルによる評価例
(福島第一6号機と NUPEC/JNES 配管試験比較)

東北地方太平洋沖地震という限界的な地震動によって、配管の累積疲労破壊に対する耐震性能が極めて高いことが確認されたことの意義は大きく、配管が脆い材質で出来ていないか、腐食が過度に進んでいないか、溶接の欠陥はないか、ネジ継ぎ手部に大きな力がかからないか、更には、地盤沈下や配管が接続された機器の移動などにより過大な強制変形を受ける構造となっていないかというポイントが点検などによって確認されれば、事実上、耐震性の評価は不要といえるであろう。

この溶接配管の例にみられるように、サイクリックに作用する慣性力による地震荷重は、内圧などの一方方向に長時間作用する荷重と異なり、応力種別上は1次応力と2次応力の中間的な特性をもつと考えられており、現在の耐震設計の基準は極めて安全側の評価を与えている。

Ⅲ. 「地震に強い原子力発電所」を目指して

1. 耐震クラス B, C 設備の耐震性

ここで、耐震クラス B, C の設備は第1表に示すように、基準地震動を用いた動的設計ではなく、静的な荷重によって設計されていることに留意せねばならない。

また、初通過破壊に対していえば、耐震クラス B, C の設備がこれまで述べてきたような高い耐震性を有するという事実は、地震国日本の長い経験に基づき、簡便で

かつ設計者の理解が容易とされている静的設計の手法が極めて有効であることも示している。

静的設計法の地震荷重を定める静的震度は発電所の立地点によらず、また、適用される指針改訂の年代、基準地震動の見直しの有無によらずに、初通過破壊に対する原子力発電所の耐震性能を生み出している。この荷重を静的(時間によらず)に評価し、応力状態を弾性範囲内とする手法によって、 A_{JMA} 値を静的震度としたときの計測震度、すなわち、クラス C の設備では計測震度 5.5 (震度 6 弱) 程度の耐震性能を有すると考えている(第2図参照)。

1995 年の阪神淡路大震災では、震度 5 弱が観測された地点で火力発電所にボイラ鉄骨関係の損傷が発生している。すなわち、原子力発電所の耐震性は、発電能力という観点でも火力発電設備よりも優れていることになる。

東南海地震では、多くの原子力発電所の立地点は想定される震源域から遠く、距離減衰によって震度 5 弱から 6 弱程度が想定されることから、ハード上の追加対策を施すことなく、地震後の電力供給に主要な役割を果たすと期待される。

一方、一般産業施設も大地震で得られた貴重な教訓を踏まえて耐震性が強化されている。「地震に強い原子力発電所」との期待に応えるためには、耐震クラス B, C の設備についても、一般産業施設の耐震設計基準と同等以上の耐震性をもたせることが望まれる。

2. 地震発生後の対応ガイドラインの整備

2011 年は米国の原子力発電所にとっても多難な年であった。11 月に発生した米国バージニア州 Mineral の地震では、North Anna 原子力発電所(971MWe, 963MWe の PWR 2 基)が設計基準を超える地震動に遭遇し、外部電源の喪失、安全保護系の作動による原子炉自動停止を経験しながらも、3 ヶ月後には再起動し、現在も安定した電力供給を行っている。地震で自動停止し、事業者の大変な努力にもかかわらず、地震発生後 3 年経っても再起動していなかった柏崎刈羽原子力発電所(2～4 号機)との差は、何によるものであろうか。

第一には、米国では約 20 年前に全プラントの耐震余裕評価を実施しており、観測された地震動が、幸いにして耐震余裕評価で想定した地震動の強さを下回っていたことが挙げられるが、地震後の対応を示すガイドラインが米国では既に整備されており、原子力規制委員会(NRC)及び事業者がそれに沿って粛々と点検、評価作業

第1表 原子力発電所の設備に考慮される設計用地震荷重

原子力発電設備の耐震クラス	耐震設計で考慮する荷重	設計荷重の比率
S (旧指針のクラス A) (原子力発電所の安全上重要な設備)	クラス C の 3 倍の静的荷重 基準地震動による動的荷重	3 以上
B (放射線に係る設備で、影響の小さいもの)	クラス C の 1.5 倍の静的荷重 (共振について動的に検討)	1.5
C (一般の設備と同等の耐震性を有する設備)	建築基準法並みの静的荷重 (全プラント一律)	1 (約 0.2 G に相当)

を進めることができたことも大きな要因と考えている。

米国では1986年のPerry原子力発電所（商業運転開始前）で設計基準を超える地震動を観測したことを契機として、1989年に地震後の対応に関する民間指針（EPRI NP-6695）を作成し、1997年にはNRCが認定している。

また、2005年の宮城県沖地震を契機として、IAEAのISSCで安全報告書（Safety Report Series 66）の作成を開始し、2012年に発行された。これに併行して日本原子力技術協会（後に原子力安全推進協会（JANSI）に改組）に組織された「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会」（略称SANE委員会）では日本の特殊条件を反映した地震後の健全性評価ガイドラインを発行しており、その活用が期待される。

それら一連の活動の中で課題として残されたDIPの選定や地震時の原子炉自動停止の必要性などが現在もIAEAで継続検討されており、技術検討書TECDOCのドラフトが完成して内部レビューを実施中である。

例えば、DIPの選定については、本稿で述べてきた A_{JMA} と標準CAVが有力な候補として挙げられ、それらを2次元の座標とする評価法（第5図参照、目次にカラー図掲載あり）が提案されている。

3. 地震スクラムの必要性和設定値

「日本の原子力発電所は地震で直ぐに停止する。地震に弱い」との誤解も生じているが、これは、我が国の原子力発電所は観測された地震動の大きさによって自動的に原子炉を停止するシステム（原子炉保護系の一部）の設置が義務付けられており、その作動レベル（加速度値）が低く設定されていることによる。

このシステムは、我が国が初めて英国から導入した黒鉛減速ガス冷却型の原子炉（東海1号炉、現在廃炉中）の地震時制御棒挿入を確実にを行うための施策であったが、その後の軽水炉では制御棒の地震時挿入性が実証されており、原子炉に異常があった場合は原子炉保護系が作動して制御棒挿入信号が発せられることなどから地震計の信号による自動停止は不要との考えがあり、その必要性に関する国際的な議論が続いている（地震後の電力供給を重視する観点などから、米国ほかの多くの諸外国では地震計を用いた原子炉自動停止は実施していない）。

特に我が国の問題は、原子炉を自動停止させる地震動の設定レベルは旧耐震設計審査指針の設計基準地震動S1程度に設定することが妥当とされているにもかかわらず、技術的な根拠のない極めて低い値としている例があり、基準地震動が見直されているなかで放置されていることであろう。原子力発電所の耐震能力が明確となった現在、適切な設定値、更にはより合理的な原子炉自動停止信号の選択などの改善が望まれる。

第5図 観測された地震動の強さの評価法(案)

IV. まとめ

1. スクリーニングなどソフト技術の深化

2つの大地震を経験することによって、地震動の特性と損傷との関係、特に、どのような地震に対して、どのような設備が脆弱であり、また極めて耐震余裕が大きいか明らかとなってきた。これらの知見を、例えば、地震時リスク評価の基本であるスクリーニング（リスクに寄与しない因子は評価対象から除外する）、更には、前述の原子炉自動停止信号の適性化、地震影響を迅速に評価するための地震動計測、塑性エネルギー吸収係数を用いた耐震余裕の評価などに生かしていくこと、すなわち、ハード技術に裏付けられたソフト技術の深化が、予想される大地震に備える原子力発電所にとって重要であろう。

2. 原子力発電所への期待

大地震発生時には、社会的安全性の観点から、電力供給が極めて重要であり、被災地では電力の復旧を多くの人が心待ちにしている。

大地震の経験を踏まえて、原子炉の自動スクラム設定値を本来の目的に沿ったものとするなどの対策を実施し、地震後の電力供給に原子力発電所の優れた耐震性能を役立てていただくことを願って止まない。

－ 参考資料 －

- 1) 長澤和幸, 他, 「加振試験による機械基礎定着部の健全性評価検討」, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, (2009).
- 2) 原子力安全基盤機構, 04基構報-0002, 平成16年6月.
- 3) 皆川佳祐, 他, 「エネルギー釣合式による機械構造物の地震時疲労寿命評価」, 日本機械学会論文集, 75巻760号, (2009).

著者紹介

落合兼寛（おちあい・かねひろ）
原子力安全推進協会
（専門分野/関心分野）プラント計画・設計、外部事象対策