

# 原子力発電所の自然現象に対する技術基準要求 に関する調査検討

Investigative study on the technical code requirements of natural events  
hazards for nuclear power plants

日本エヌ・ユー・エス㈱	伊藤 邦雄	Kunio ITO	Member
東北大学流体科学研究所	青木 孝行	Takayuki AOKI	Member

Technical codes and standards on natural phenomena, in particular, earthquake and tsunami for nuclear power plants in the other developed countries including IAEA safety standards were investigated. Then, the results were compared with the corresponding Japanese technical codes and standards. As a result, it was found that: (1) technical codes and standards on natural phenomena, especially those for earthquakes and tsunami/flooding in those foreign countries and their requirements are all included in the Japanese technical codes and standards. (2) Nevertheless, the actual measures against tsunami/flooding in those foreign countries are more advanced than those in Japan which had been taken before Fukushima accident. Therefore, further investigation is needed to clarify the reason why there are such differences by investigating the details of the basic ideas and evaluation methods for the protection of tsunami/flooding.

**Keywords:** Tsunami, Natural Phenomena, Technical Standards, Flooding, Probable Maximum Tsunami, Fukushima

## 1. はじめに

昨年3月、東北地方太平洋沖地震が発生し、その直後に来襲した津波により、東京電力福島第一発電所1～3号機が全電源喪失とそれに続く原子炉冷却機能喪失を起こし、その後、炉心損傷、水素爆発、格納容器の閉じ込め機能喪失という一連の過程をたどって最終的に放射能を外部へ放出するという事態となった。これまで、国の「東京電力福島原子力発電所事故調査委員会」をはじめ、いくつかの報告書が公表されているが、いずれも地震に対して発電所の機器は正常に動作し、原子炉冷却を開始したが、その後来襲した津波により非常用電源喪失等の一連の事象が発生したものと推定している。

これまで我国の原子力界は積極的に地震に対する調査、検討に取組み、随時、最新知見を取り入れて耐震設計基準の見直しに取り組むなどして対応してきたため、今回の地震を含む近年発生している大地震にも十分耐えられる高度な基準を作り出してきたと考えられる。その反面、津波に対する調査、検討は、地震に対するほど積極的に行われて来なかったようである。その証拠に、最近になって内陸部の地層中における津波痕跡の調査が進められ、新たな知見が公表されている。

今回の地震、津波の経験から、地震、津波はもとより、原子力発電所が考慮しなければならない他の自然現象（洪水、風、凍結、積雪、地滑り等）への備えが我国の原子力発電所で十分に為されているか、懸念されるところである。

以上のような状況を踏まえ、本稿では先進諸外国の原子力発電所に対する技術基準とその関連規格が自然現象に対する備えをどのように要求しているか、またその要求に従って実際の原子力発電所がどのように出来上がっているか調査する。その調査結果を我国のそれと比較することにより、我国の技術基準とその関連規格の要求内容に問題がないか検討、評価する。

## 2. 諸外国の自然現象に対する技術基準の要求

### 2.1 米国

津波や洪水など自然災害についての米国原子力規制委員会 (NRC) の設計基準要件は、1971年の一般設計指針 (GDC) に規定されており、その審査基準が関連の標準審査指針 (SRP) や Reg. Guide に示されている。

GDC-2「自然現象に対する防護設計基準」(1971年)では、以下の規定がある。すなわち、

「安全上重要な系統・構築物・機器 (SSC) は、その安全機能を果たす能力を喪失することなく、地震、トルネード、ハリケーン、外部洪水、津波及び静振といった自然現象

連絡先：伊藤邦雄、〒160-0023 新宿区西新宿 7-5-25  
西新宿木村屋ビル5F、日本エヌ・ユー・エス株式会社、  
E-mail: itohk@janus.co.jp

の影響に耐えるよう設計しなければならない。これらの SSC の設計基準は、以下を反映しなければならない。

- (1) サイト及び周辺領域で記録されている最も厳しい自然現象に対する適切な考慮。データの正確さ、量及び過去のデータが残されている期間が限定されていることについて、十分な余裕を持たせること。
- (2) 自然現象の影響と、通常時及び事故時の条件の影響との適切な組合せ。
- (3) 発揮すべき安全機能の重要性。」

これを受けて、NRC が事業者の建設許可や運転認可申請に添付される安全解析報告書を審査するための標準審査指針 (SRP、NUREG-0800) の第 2 章 (初版 1975 年 11 月、最新版 2007 年 3 月) 「サイト特性及びサイトパラメータ」の 2.4.2 節「洪水」において、津波、河川洪水、上流ダムの決壊など種々の外部起因の洪水の審査基準が示されている。また、2.4.6 節 (Rev.3) 「想定最大津波ハザード」では、歴史的津波データや最大想定津波についての審査の方法や承認基準が、2.4.10 節 (Rev.3) 「洪水防護要件」では、安全関連設備の位置や洪水防護機器に対する審査の方法や承認基準が示されている。ただし、既設プラント設計が審査された頃 (1970 年～80 年) の SRP の内容は、最新版ほど記述が詳しくない場合が多い。なお、最大想定津波 PMT (Probable Maximum Tsunami) 高さの定義は下記の通りであり、当該サイトと周辺地域における過去のデータとそれに対して十分なマージンを組み合わせた高さとして設定される (SRP 2.4.6 の最新版)。

「想定最大津波 (PMT) : サイトでの衝撃が、入手可能な最良の科学的情報を利用して引き出され、以下の三点を考慮して、その結果原子力発電所に影響することが合理的に想定される一連のシナリオに行きつく津波のこと。

- (1) そのサイトと周辺地域に対して歴史的に報告されてきた最も苛酷な当該自然現象を適切に考慮して、蓄積された歴史的データが有する正確性、品質、期間の長さに関する制限条件に対し十分なマージンを持っており、
- (2) 自然現象の影響について通常状態と事故状態の影響を適切に組み合わせていて、
- (3) 実施されるべき安全機能の重要性を考慮していること。」

発電所の許認可において、津波影響については上記の想定最大津波の高さに対して、発電所の安全上重要な設備が防護されることを示している。

例えば、米国西部太平洋岸 (カリフォルニア州) にあるディアブロ・キャニオン発電所 (WH-PWR、2 基) では、以下のように津波の影響が解析されている。

- 最大洪水高さ (津波と同時に嵐と高潮などを考慮した高さ) として 32.0ft (9.75m) 平均海水面高さ (MSL) / 34.6ft (10.55m) 平均低低潮高さ (MLLW) を想定。
- 取水口では海水ポンプに設置されるシュノーケルと呼ばれる取り込み口によって高さ 45.4ft (13.84m) MSL / 48ft (14.63m) MLLW の水位まで海水の取り込みが防護できる。海水ポンプは設計クラス 1 で、海水ポンプモータは取水構造物内の水密性区画におかれている。
- その他の主要建屋・設備は、以下のような高さに配置されている：
  - ディーゼル発電機はタービン建屋内の 85ft (26m) 高さに設置。
  - ディーゼル燃料貯蔵タンクはタービン建屋西側の 85ft (26m) 高さに設置。
  - バッテリーは補助建屋内の 119ft (36m) 高さに設置。
  - 発電機関係は 85ft (26m) 高さでコンクリート内に収納。
  - 貯水池とドライキャスク貯蔵は 310ft (94.5m) 高さ。
  - 使用済燃料プールは燃料取扱い建屋の 140ft (42.7m) 高さ。

この発電所の高さ関係を図 1 に示す。図の右側は福島第一発電所のものである。

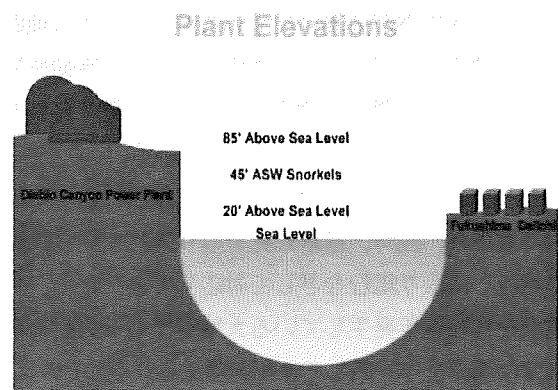


Fig-1 ディアブロ・キャニオン発電所の高さ<sup>(6)</sup>

また、1991 年の外部事象個別プラント解析 (IPEEE) では、当初の設計の想定を越える外部事象の可能性とその対策の評価が要求された。そのうち強風、洪水、輸送及び付近の施設での事故については、各発電所の設計基準を評価するスクリーニング・アプローチが用いられた。

そこでは、まず、1975年の標準審査指針（SRP）基準との適合性が評価された。SRPに適合していて、踏査で確認できれば、このハザードによる炉心損傷頻度は $10^6$ /年以下とみなされ、それ以上の評価は不要とされた。IPEEE評価では結局、ほとんどの発電所（約80%）では定性的スクリーニング手法を用い、約15%で確率論的リスク評価（PRA）（部分的・境界解析的なPRAを含む）などが行われた。70件の提出物の中で、強風、洪水、その他の外部事象に関して脆弱性を摘出したものはなかったが、34の提出物で合計64か所の改善策案が報告された。例えば、セーラム発電所では、外部事象の炉心損傷頻度（CDF）を3桁低減する改善策として、外部洪水からの防護のためのサービス・補助建屋のドア関連部シールの改善その他が報告された。

福島事故の後NRCは、設計基準自然災害への防護の方法には発電所によって差が出てきていることを認識し、2012年3月12日、各事業者に対して地震と洪水に対する関連情報（ハザードの再評価を含む）の提出を要求している。

## 2.2 フランス

基本安全原則（RFS）において、洪水に対する安全余裕レベル（CMS）が規定されている。海岸サイトの場合、CMSは最大計算潮位（潮位係数120）と1,000年高潮の組み合わせに対応する高さとしてされている。

1999年12月、ルブレイエ発電所で暴風雨による外部洪水を経験したため、洪水防護対策が見直し・強化された。その際に取りられたルブレイエ発電所の短期措置としては、既存堤防の高さの見直し（引き上げ）、堤防頂上への防護壁の設置がある。また他の発電所を含む長期的措置として、全サイトで浸水防護システムの調査、最大想定水位の見直し、数サイトで堤防の改修、手順書の変更、溢水対策（安全関連機器エリアへの浸水対策（2007年完了））が施された。なお、フランスでは、津波については、地震活動の低さなどから他の原因が支配的であるとして詳細な評価は要求されていない。

現在は、洪水リスクの評価を含めるよう基準の改訂版を作成中である。福島事故後のストレステストでは、設計基準を超える洪水によって引き起こされるクリフエッジ影響が見出されており、これらの問題について事業者は更なる検討の実施を提案している。

## 2.3 ドイツ

洪水からの防護要件は、原子力技術基準委員

会（KTA）スタンダード2207に規定されており、設計基準洪水の水位は $10^4$ /年の確率から算出されている。なお、十分な事前警告などが可能な場合は、 $10^2$ /年の確率の洪水と設計基準水位の間の洪水に対しては可搬式の洪水防護策の利用も許容される。

ドイツの原子力発電所はこの基準に従って、上流ダムの損壊を含めた事例について、全ての関連設備や構築物に対して恒久的な（あるいは条件付で可搬設備による）洪水防護策が提供されなければならない。なお大部分の原子力発電所は内陸の河川立地であり、安全上重要な構造物は水密性構造、開口部（ドアなど）の高さの確保などが進んでいる。

ストレステストにおいては、設計基準を超える洪水についての安全マージンも評価されており、潮汐影響を受けるサイトでは、 $10^4$ /年より低い確率の洪水事象に対しての方策（予備品の貯蔵、可搬式設備の利用タイミングの変更、堤防高さのかさ上げなど）を検討している。

## 2.4 IAEA

2003年公表のIAEA Safety Standards NS-R-3「原子力施設のサイト評価」（2003年）で、津波の評価について、以下のように記述している。

- 当該地域の有史以前、歴史的そして計測された地震に関する情報を記録し文書化すること（3.2節）
- 地震データと地質学データの両者から短期間の地震の再来間隔が明らかとなるような、地盤活動が活発な地域では、活断層の評価には数万年の期間が適切であるかもしれない（3.6）
- 津波の可能性がある場合は、有史以前と歴史上のデータを収集し、サイト評価との関連について批判的に評価すること（3.25）
- 地震に起因する津波の可能性は既知の地震の記録や起震特性に基づいて評価されなければならない。津波のリスクは、既知の地震の記録や起震特性からだけでなく、物理的および/または解析モデルから導出されなければならない。（3.27、3.28）

福島事故を受けて米国カーネギー国際平和財団が2012年3月に発表した報告書では、「地震や津波に関する外部事象の評価では、歴史的にどこまでさかのぼるべきか」という課題について、上記のIAEAスタンダードを引用して、「IAEAの公表する良好事例では、10,000年に1回しか起こらない地震に対して防護するために、有史以前

と歴史的な地震と津波のデータの収集を必要としている」と述べ、福島での想定が不十分であったと指摘している。また、日本では、津波によって引き起こされる水力学的衝撃力の評価やデブリの影響の評価が不十分であったが、IAEA ではそれらについても考慮すべきとしている、と指摘している

### 3. 検討

前節における調査の結果をまとめて Table 1 に示す。

Table 1 Technical Code Requirements

国名	技術基準（津波・洪水）
米国	一般設計指針（GDC）（1971年）に規定され、その審査基準が関連のSRPやReg. Guideに示されている。サイトとその周辺で記録される最も厳しい自然現象を考慮し、十分な余裕を持たせること、とされている。
フランス	基本安全原則（RFS）で、洪水に対する安全余裕レベルが規定されていたが（最大計算潮位と1,000年高潮の組み合わせ）、1999年12月にルブレイエ発電所で暴風雨による外部洪水を経験したため、洪水防護対策が見直し・強化された。
ドイツ	KTAスタンダード2207に規定され、設計基準洪水の水位は $10^{-4}$ /年の確率から算出されている。なお、十分な事前警告などが可能な場合は、 $10^{-2}$ /年の確率の洪水と設計基準水位の間の洪水に対しては可搬式の洪水防護策の利用も許容される。
IAEA	IAEA NS-R-3「原子力施設のサイト評価」（2003年）で、津波について有史以前と歴史上のデータを収集すること、また、地盤活動が活発な地域では活断層の評価には数万年の期間が適切、としている。

我国の発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（平成2年8月30日）の指針2「自然現象に対する設計上の考慮」では、

「安全機能を有する構築物、系統及び機器は、地震以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれない設計であること。重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、予想される自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。」

と規定している。この内容は、そのベースとなった米国の一般設計指針（GDC）とほぼ同様のものと言える。

このように、基準上の表現を比較すると、先進諸外国と我国で大きな差は認められない。しかしながら、問題は基準に基づく実際の運用をどのように行っているかである。特に、福島事故以前においてどのように考えていたか、ということである。例えば、地震、津波について

言えば、下記をどのように選定しているかが問題である。

- (1) 発電所の設置地域において過去何年まで遡って最大地震、最大津波を選定するか
- (2) 距離的には発電所からどの範囲に発生した最大地震、最大津波を考慮に入れるか
- (3) 過去の文献、古文書等の調査のほか、実際の地質調査をどの程度行うか

また、下記について調査し、我国の原子力発電所と比較することは、我国の自然現象に対する備えの世界における相対的レベルを知る上で重要である。

- (4) 海外の原子力発電所に適用されている自然現象に対する基準に従って海外の原子力発電所における自然現象に対する備えが、実際にどのように設計、施工されているか

上記(1)の時間軸については、平成18年9月に原子力安全委員会が、考慮すべき活断層の活動時期の範囲を、従来の5万年前以降から後期更新世（約12～13万年前）以降へと拡大した経緯がある。しかしながら、津波については、安全設計審査指針を具体化した「原子力発電所における津波評価技術」（2002年2月、土木学会）では、1611年～1978年（約400年間）の歴史津波を利用して数値シミュレーションを行い、想定最大津波を評価する手法が示されており、必ずしも十分であったとは言えない。

その後、原子力安全・保安院において東北地方太平洋沖地震の知見を踏まえて設計基準津波の検討が行われ、平成24年3月に「津波高さ、浸水域、浸水高さ、浸水時間、津波の破壊力を示せる適切な津波モデルを用い、数値シミュレーションを行って求める。この際、当該設計基準津波は、一定の発生頻度（例えば、 $10^{-4}$ /年）を包絡するように設定する。」との方針が示されている。

上記(2)の発電所からの距離については、明確な規定がない。地震は発電所地域の活断層を考慮して地震動を設定する考え方をとってきており、したがって活断層の位置でその考慮範囲が決まることになる。福島事故後、東海、東南海、南海の三連動地震のように従来、個別のものとして扱ってきた活断層を連動させる方向、すなわち範囲を拡大して取り扱う方向に変化してきている。これは諸外国に見られない、福島事故の経験を踏まえた地震国である我国の保守的な考え方といえることができる。一方、津波については、三陸地方で巨大な津波が来襲したことがあることを示す石碑などがあるが、これらの情報が三陸地方に隣接する地域に適用されていない。この理由については、今後十分に究明する必要がある。

上記(3)の過去の調査については、我国では地震に関する文献調査や活断層調査が盛んに行われ、その都度、調査結果が耐震基準に反映されてきたと言える。しかしながら、津波に関する調査は十分であったとは言えない。なぜなら、福島事故後、多くの津波痕跡調査が実施され、その結果が新たな事実が発見されているからである。

上記(4)については、太平洋の向こう側で立地条件が異なるとは言え、同じ海に面して設置されているディアブロ・キャニオン発電所の海水防護対策は、福島事故以前の我国のそれと比較して格段の差がある。この差の理由については、今後十分に究明する必要があると思われる。

#### 4. まとめ

先進諸外国の原子力発電所に対する技術基準とその関連規格が自然現象、特に地震および津波（洪水）に対してどのように規定しているか調査し、その結果を我国のそれと比較、検討した。以下に、本調査検討で得られた知見をまとめて示す。

- (1) 先進諸外国の自然現象、特に地震および津波（洪水）に対する技術基準とその関連規格の要求する項目はいずれも、我国の技術基準とその関連規格の中にも含まれていることが分かった。今後は、さらに自然現象の一つひとつに対してその考え方や評価方法の詳細を具体的に調査し、その違いを明確にすることが重要である。
- (2) 我国の技術基準やその関連規格は、先進諸外国の技術基準やその関連規格の要求項目をすべて含んでいたとしても、それらに基づき設計、施工したハードウェアが実際にどうなっているか、大きな違いがあるのか、あるとすればその理由は何かを明確にすることが重要である。その中には、自然現象に対する設計条件を設定する上で歴史的な自然現象の調査期間や考慮に入れる距離的範囲、更には文献調査や地質調査などを、どの程度の範囲と深さで実施するか、という視点が含まれているべきである。
- (3) 設計基準津波高さを適切に想定し、それに対する発電所の耐久性を確保することも重要ではあるが、米国の

IPEEE 評価や欧州のストレステストで行われているように、設計基準を超えた事象にどこまで耐久性があるか、という観点で評価することも重要である。

- (4) 自然現象に対する発電所の耐久性については、福島での事故を契機に、欧米諸国でその技術基準や評価のあり方が見直しされてきており、その内容は今後我国にとっても参考になると考えられる。

#### 参考文献

- [1] JANUS-LIS 総合ファイル
- [2] NUREG-1742, Final Report, Perspectives Gained from the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) Program, April 2002.
- [3] Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition (NUREG-0800, Formerly issued as NUREG-75/087)
- [4] NUREG-1407, Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities
- [5] Diablo Canyon Fact Sheet, Seismic and Tsunami Issues
- [6] Diablo Canyon Power Plant Facility Overview, PG&E, March 22, 2011
- [7] Peer Review report on EU Stress Tests for France, 26 April 2012
- [8] KTA 2207 (11/2004), Flood Protection for Nuclear Power Plants
- [9] Peer Review Report on EU Stress Tests for Germany, 26 April 2012
- [10] IAEA Safety Standards Series, Site Evaluation for Nuclear Installations Safety Requirements, No. NS-R-3, 2003
- [11] The Carnegie Papers, Why Fukushima Was Preventable, March 2012
- [12] 「津波に対する安全性に関する審査の手引き（設計基準津波に関する検討方法等）」について（議論のたたき台）、平成24年3月28日、原子力安全・保安院

(平成24年6月13日)