原子力安全のための耐津波工学(その7)最終回

耐津波工学の課題と展望

京都大学名誉教授・電力中央研究所 亀田 弘行, 他

7回のシリーズで、報告書「原子力安全のための耐津波工学～地震・津波安全の総合技術体系を目指して」¹⁾(編纂：日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会/協力機関：日本原子力学会 標準委員会)にとりまとめられた地震・津波に対する原子力安全の総合技術体系を解説してきた。その最終回として、「原子力安全の耐津波工学」の今後の課題と展望を論ずる。

KEYWORDS: *nuclear safety, earthquake-tsunami protection, integrated engineering framework, implementation, latest findings, engineering enhancement, cross-disciplinary collaboration, international agenda, roles of academia*

I. はじめに

本解説シリーズでは、日本地震工学会「原子力安全のための耐津波工学に関する調査委員会」(「耐津波工学委員会」と略称)の成果¹⁾である「原子力安全の耐津波工学」を体系的に説明してきた。そこでは、総合的視野とともに、それを支える多分野の協働の重要性、特に日本原子力学会との密接な協力の意義を強調した。

これらの成果は当然、広範な課題への第一歩であり、すべてに決着がついたわけではない。本稿では、上記報告書の第11章に基づき、将来への「耐津波工学の課題と展望」を論じ、本解説シリーズのまとめとする。

II. 耐津波工学の成果と技術的課題

1. 耐津波工学の到達点

本シリーズの(その1-II.3.)において述べたように、耐津波工学委員会は5項目の目標を掲げて討議を進めた。それらは、「原子力安全の耐津波工学」を構築するための共通の規範であり、得られた結果は現段階の到達点である。それらを具体的に整理すると、以下のとおりである。

Tsunami resistant engineering for nuclear safety (No. 7) ; Perspective on tsunami resistant engineering for nuclear safety : Hiroyuki Kameda.

(2015年9月24日 受理)

■前回のタイトル

シリーズ(その6)施設周辺地域における防災・減災対策の推進とリスクコミュニケーション

1) 工学技術の把握

- ・原子力発電所総体としての深層防護や要求性能と関連付けた津波工学技術の体系的整理

2) 深層防護とリスク論の位置づけの明確化

- ・深層防護とリスク論の連携構造
- ・深層防護全体を一貫する安全確保策構築の重要性
- ・一般防災と原子力防災との連携

3) リスク論に基づく地震・津波安全評価体系の明確化

- ・リスク論に基づく総合的意思決定の考え方
- ・PRA(確率論的リスク評価)の方法とその効用
- ・深層防護レベルとの対応
- ・設計による要求性能の実現とリスク論による目標性能の検証としての相補的役割
- ・リスクコミュニケーションとの関わり

4) 分野横断的討議をふまえた総合的視野の構築

- ・地震工学, 津波工学, 原子力安全工学の分野横断的で総合的な視野の獲得による分野間連携活動
- ・津波防御のために重要な基本概念や用語について, 分野間で情報共有する解説(コラム)を作成

5) 「耐津波工学」の体系化への試み

- ・地震・津波に対する原子力安全実現への総合工学的枠組みを「原子力安全の耐津波工学」として体系化
- ・「耐津波安全の基本要素」, 「津波の作用, 影響, 工学的方法」, 「社会との関わり」を統合する包括的内容
- ・多分野の協働

こうして得られた耐津波工学の総合体系は本シリーズ(その1)で要約した。さらに詳しくは、報告書¹⁾を参照

されたい。

2. 技術的課題

「原子力安全の耐津波工学」の体系化を進めてきたが、工学技術の練磨は常に要請される。この観点から、今後

の技術開発課題を委員会メンバーから体系的に収集した。それらを、要約し、耐津波工学の柱である「耐津波安全の基本要素」、「津波の作用、影響、工学的方法」、「社会との関わり」について示すと、それぞれ第1表、第2表、および第3表のとおりである。

第1表 本活動の成果と課題(耐津波安全の基本要素に関する事項)

	目標	成果	課題
(1)	深層防護とリスク概念の原子力安全枠組の構築	<ul style="list-style-type: none"> ▶ リスク概念を根幹にした津波防御体系化(例：多様な対策の有効性、重要度、優先順位の判断と対策の実施、実施結果を設計や対策、さらに緊急時防災活動も含めた安全性確保の多重化検討へのフィードバック) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ より成熟した安全の概念を確立するためには、リスク概念の理解と定着が一層重要 ▶ 個別の要素技術の開発の必要性も認識しつつ安全確保の体系化の向上
(2)	広範な事故シナリオと要求性能との有機的統合	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 事実、論理性、想像力を重視して同定した地震・津波事故シナリオを基に、構築物、系統および機器(以下、SSC：Structure, System and Component)の要求性能を、津波作用のパターンに応じて展開 ▶ 深層防護をベースに、津波の作用に応じて、設計基準内でのSSCの要求性能を分類し、設計基準超の津波作用に対しては、アクシデントマネジメントにより環境への影響を抑えることに位置づけ 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 防潮堤の洗掘、敷地内地下の見逃し水道(みずみち)、水密扉枠の地震動によるゆがみ、などの考慮による事故シナリオの網羅性拡大 ▶ 地震と津波の重畳、津波による火災の重畳などの複合事象への拡張によるプラントの包括的リスク低減

第2表 本活動の成果と課題(津波の作用、影響、工学的方法に関する事項)

	目標	成果	課題
(1)	複合被害の同定に関する継続的調査	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 津波来襲に伴う津波火災や漂流物による被害の連鎖・拡大のメカニズムを整理 ▶ 津波ハザード評価の情報源として、津波堆積物の有用さを整理 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 津波火災や漂流物の作用のメカニズム把握のために、東日本大震災における複合被害の事例の継続的な調査 ▶ 防潮壁等の越流により敷地内へ津波が流入する場合、防潮堤背後の建屋等施設への作用波力評価手法整備 ▶ 堆積物を用いた古津波の評価・解釈についての継続的な議論
(2)	津波作用下でのSSCの挙動に関する津波工学的知見の深化	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 津波作用と損傷モード及び工学的な対応の整理 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 津波の繰り返し襲来による影響、津波による二次的な影響(洗掘、砂移動、漂流物等)、地震による敷地の隆起・沈降、地震(本震及び余震)による影響、などの考慮 ▶ 様々な施設への漏水・浸入経路の特定に係る不確定要素の検証 ▶ 水理学的対抗および構造工学的対抗、さらに両方の機能をもつハイブリッドの対抗にかかる技術開発 ▶ 水理実験による基礎現象の再現と解明、およびそれを評価・予測できる数値解析モデルの開発 ▶ 構築物・施設の配置や機能を柔軟に変更できる手法の開発
(3)	津波フラジリティ解析のモデルの精度向上	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 津波フラジリティ解析における、実施手順の展開 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 津波ハザード曲線横軸の物理パラメータの詳細定義 ▶ サイト外郭施設や建造物の越流・浸水解析のような非線形性の強い物理現象における誤差伝搬解析問題への取り組み ▶ モデルの精度向上 <ul style="list-style-type: none"> ・漂流物のサイト内への侵入等による建造物外郭構造への衝突破壊の事象のモデル ・サイト内の油脂拡散に伴う火災のモデル ・サイト内の湛水や屋内での侵入・湛水による人間や物資の移動阻害のモデル ▶ フラジリティ解析における打ち切り誤差
(4)	耐津波工学関連の解析コードの拡張	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 耐津波工学の実践に必要な解析コードの開発整備状況の整理 ▶ 流体挙動に関する3次元数値計算コードによる研究事例(波浪の変形含む)の整理 ▶ 津波発生から沿岸まで、さらに原子力発電所への影響を包括的に評価する活用可能性を検証 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 山体崩壊や海底地すべりによる津波発生に関するコードの検証、データの蓄積 ▶ 津波の発電所敷地への浸水、設備や機器への影響(被水、没水、流体力)の実用的な評価方法について議論の深化。 ▶ 取水ポンプへの影響の観点から巻きあげられた砂の濃度に関する数値計算コードの精度の向上と、実験計測データの充実ならびに、流体内の任意の場所の濃度の評価が可能な解析コードの開発 ▶ フラジリティ評価における設備や機器に対する浸水や流体力などの標準的な手法の確立 ▶ 確率論的な津波ハザード評価からフラジリティ評価を効率的に処理する解析コードの構築

第3表 本活動の成果と課題(社会との関わりに関する事項)

	目標	成果	課題
(1)	地域における津波減災に向けた科学的取り組み	<ul style="list-style-type: none"> ▶津波に対する一般的防災・減災対策の考え方を俯瞰 ▶総合的な津波防災の理念：ハード対策での、既往最大津波の記録などをもとに津波の規模を決定し、波浪や高波の検討も踏まえたうえでの海岸堤防による陸地への浸水の防護と、ソフト対策での、それを越える規模の津波に対しての早期避難を中心とする被害の最小化による、ハード、ソフトの二段階の津波防災の枠組みの明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ▶津波の市街地氾濫による堤防破壊、氾濫被害分析を含んだ減災性能の数値シミュレーション技術の開発整備 ▶堤外地の産業施設等につき、経済活動と減災対策の関係から、事業継続計画(BCP)の策定 ▶原子力サイトの津波対策が周辺地域に与える影響の評価のための、科学的評価、立地地域全体での防災・減災能力の向上
(2)	地域との原子力リスクコミュニケーションの推進	<ul style="list-style-type: none"> ▶原子力事業者と地域とのリスクコミュニケーションは、自然災害のリスクに関するリスクアセスメント情報を周辺自治体や地域住民と共有することを提起 ▶原子力事業者及び周辺自治体による原子力複合災害のリスクに関する情報の共有、また、地域コミュニティを加えた協働によるリスクマネジメントの枠組みの具体化の重要性を提起 	<ul style="list-style-type: none"> ▶地域住民とのリスクコミュニケーションの重要性の共有と具体化技術の開発 ▶その具体化技術に基づく、住民の視点に立った防災計画の策定、情報共有技術の開発 ▶フランスの「原子力安全透明化法」など国際先進事例の消化

Ⅲ. 耐津波工学に学術が果たす役割

本委員会の討議の過程で、学術の役割について、多くの討議が交わされた。2014年3月に開催した「原子力安全のための耐津波工学に関するシンポジウム」においても、これを主題とするパネル討議を行い、広く意見交換を行った。それらを踏まえて、以下に、原子力安全の耐津波工学をより充実させるうえで学術が果たすべき役割を提起する。

1. 耐津波原子力安全確保の実践に向けた学術の役割

耐津波原子力安全の総合的枠組みを発電所施設の設計・評価・運用・規制の技術基盤として実装してゆくために、学術が果たすべき役割をとりまとめた。それらは、第一に総合的枠組みの具体的提示、第二に最新の科学的知見と技術的成果を的確に反映する技術規範の提示である。

これを、各組織分野との関連で以下のように示した。

- ①事業者：学術は、事業者の広範なニーズを把握し、分野を超え恒常的にサポートする必要がある。それには本報告書で提案した総合的枠組みの具体的実践が必須である。
- ②原子力規制セクター：学術界からの強力な協力体制の確立が必要である。原子力安全確保は総合的な学術分野にわたる問題であるから、多くの学協会からの技術的サポートと学術的貢献が必須である。現在の規制において、リスク概念の導入(残余のリスクの評価と活用)、津波PRAによる安全性評価結果の活用、現行耐津波設計クライテリアの見直し(深層防護の考え方の導入)などの課題が考えられる。
- ③社会一般：発電所周辺の住民や国民と、学術とのコミュニケーションにおいて、国民のニーズを適切に把握した上で、科学的、工学的専門集団として学術の立

場から、多様なニーズに応え、リスクコミュニケーションを中心に、信頼を得られる努力が必要である。

- ④学術界：学術を担う主要な組織である学術界の役割は大きい。耐津波設計手法、規準や指針、評価手法等を本提案の枠組みを基に総合的な視点で見直す必要がある。津波安全確保のために実施される様々な学術的活動を深層防護の各レベルで明確に位置付け、学際領域を相互にカバーする学会間の分野連携総合的枠組みの実現を検討する必要がある。
- ⑤各組織間の連携：原子力安全に関する意思決定が科学的・技術的根拠に即して行われるために、科学・技術という共通基盤において、事業者、規制セクターに社会一般を加え、その上で学術界がその連携を支える体制の構築が必須である。こうした枠組みは原子力安全のリスクガバナンスの一翼を担うが、特に工学の責任が大きいことへの認識を促すものとして、「技術ガバナンス」なる概念が提起される²⁾。耐津波工学委員会において、技術ガバナンスを共通理念とする多くの討議が交わされた。

2. 最新の学術的知見の組み込み

福島第一事故の教訓から新たな学術的知見をどのように新知見として認め、広く活用してゆくかは、必須の取り組みである。しかし、科学的知見や技術が適切と判断され活用されるまでの課題は次のようなものがある。

- 1) 科学的知見も技術開発も、有用・不用のばらつきは大きく、発達段階も多様である。
- 2) 自然の脅威や設備故障などが事故に進展することの想定の難しさがある。
- 3) 新知見の反映要否の判断の仕組みを構築しなければならない。

これらの課題に的確に取り組むためには、次のような特性を持った体制が必要である。

- ・分野間の壁を作らない

- ・科学と技術(理学と工学)の連携
- ・工学の責任による技術アセスメントと不確定性の判断

今後の展望としては、耐津波工学委員会での協働の活動を参考に、原子力学会、地震工学会、土木学会を核に継続して協議会として、原子力に係わる情報交換と学術集団として安全確保への提言のとりまとめなどの活動を協働で進めることは、有効と考える。

原子力が持つ潜在的リスクが社会リスクであることを考えれば、原子力安全は社会ニーズであり、最新の技術、新知見に対しては、社会がその採否を判断する権利を持つものである。この観点から、新知見の収集、評価、そして社会への提示にかかる学術の責任は大きいと言わねばならない。

3. 原子力安全のための津波工学の深化

津波に対する原子力安全を論ずるに当たり、その大きな不確定性を有する自然現象を的確に評価することが不可欠である。津波防御の技術基盤をなす津波工学は、本報告書で構築した包括的評価に対応できるよう深化することが求められている。今後の深化のための課題として、いくつかの具体例を挙げると以下のようなものである。

- ①観測の充実および観測と結合したシミュレーション技術：的確な津波対応には、プラントへの到達前にできる限り早く確実な津波情報を得ること、そのために、沖合いでの監視・観測体制の充実が肝心である。さらに、リアルタイムでの津波予測システムによりプラントの対応に反映することが重要である。
- ②遡上解析、浸水解析の高度化：津波による影響や被害は、没水や被水の程度により電気機器などへの障害が異なるため、脆弱性評価の対象を広め、サイトや設備機器の周辺の複雑な津波挙動を正確に評価・予測出来る解析技術を提供できるよう、津波工学を高度化しなければならない。
- ③地震動と津波の影響の重畳：東日本大震災において、原子力発電所への津波の影響の度合いは、電源の完全喪失に大きく依存しているが、外部電源の喪失は地震動(主としてサイト外)の影響によるものであり、このような形で、現実に地震動と津波の影響は関わり合っている。サイト内では、建屋の開口部に設けられる水密扉が、地震時の建屋の変形によりどのような影響を受けるかは、現在実験的に検証されつつある段階にある。このように、津波工学と地震工学が連携すべき課題が今後、展開されるべきである。

4. 学会間の分野横断的協働

日本原子力学会が原子力安全に関する学術的進歩の中核的役割を担うべきことはいうまでもない。しかしながら、地震・津波への安全課題において、日本原子力学会のみでは十分ではないことは明らかである。日本地震工

学会と日本原子力学会が密接に協力した耐津波工学委員会の活動は、互いの概念に入り込む討議を経て、分野間協働の成果を挙げたと自負するものである。以下、この問題に関する将来への課題を考察する。

- ①外的事象課題における総合性欠如への戒め：地震・津波の場合は、プラント全体が同時に影響を受ける共通原因故障が対象となること、多重性を有するサポート系の機能喪失により複数の安全上重要なフロント系が機能喪失することなど、深層防護の概念の実装において外的事象問題に特有の課題がある。加えて、地震・津波ハザードが持つ大きな不確定性により、ハザードレベルとトータルシステムの挙動を連続的に扱うPRAが重要である。福島第一事故の背景には、このような包括的視点に基づく技術的実践が欠如していたことがあり、その基盤を形成すべき学術における多分野間の協働の不十分さに責任の一端があったことを認識すべきである。
- ②工学分野の多分野協働への取り組み：津波に対する原子力安全の課題において、ハザードとシステムを的確に結びつけるため、地震工学・津波工学分野と原子力安全工学分野の協働により、耐津波工学を構築してきた。この実績を単発で終わらせず、永続させる仕組みの構築が重要である。その実践には大いなるエネルギーと率直な意見交換の場が不可欠であり、形式的関係ではなく、信頼に基づく討議の場であればならない。自己の分野に閉じこもりがちなる専門家にとって、これは容易ではない。困難を克服するためには、それを上回る動機と的確な方法が必要である。すなわち、
 - ・動機：原子力安全への工学の使命感、明確な問題設定、深層防護とリスク論への包括的理解、人的資源、技術ガバナンスの認識、etc.
 - ・方法：個人依存ではなく学会間の取り組み、信頼こそかなめ、etc.
- ③より包括的な多分野協働：耐津波工学委員会が提起した体系には、社会との関わりを含めた。これは、工学技術は自然の摂理と社会とを結びつけるという基本に立ち帰れば、当然のことである。従って、今後の取り組みでは、工学系の学会だけでなく、リスクを課題とする社会科学系の学会との連携を求めるべきである。

5. 国際関係の強化

- ①国際標準への貢献：世界の原子力発電所で十分な安全性が実現されるよう、福島第一事故の経験とその検証のうえに築かれる技術を発信することはわが国の責務である。国際的な説得性を備えるためには、国際学会での発表は学の役割として重要であるが、それだけでは不十分であり、国際標準の中に日本の知見・技術を組み込む努力を、産官学の協力のもとに続けなければならない。

- ②わが国へのフィードバック：国際貢献の結果をわが国の原子力安全に還元することが極めて重要である。知見・技術を普及する努力の中で、国際的な討議の洗礼を受け、より広い視野を持つ普遍的な規範に育つ。これは、わが国の原子力安全にとって新たな資源となるものであり、この成果を還元することにより、わが国の原子力施設の安全性を一層向上させる途が拓け、ひいてはわが国の原子力安全の国際的信頼の復権に繋がる。学術の使命として、こうした情報を規制や事業者のみならず、広く周知する努力を継続すべきである。この観点から、IAEA(国際原子力機関)を中心にデータベースの構築や基準の整備に積極的に関わることで、米国のNRC(原子力規制委員会)との技術協力を強力に進める、などの戦略を持つべきと考えられる。
- ③近隣諸国との関係：我が国から見て偏西風の風上に位置する韓国や中国などの原子力安全が日本にとっても深刻な問題であるとの認識のもとで、新たな安全確保策を速やかに実践すること、その実績を持って、アジア諸国、特に中国や韓国に活かすよう、協働を働きかけることが重要である。そのことは直ちに、日本の安全に繋がるものである。

IV. まとめ

解説シリーズ「原子力安全のための耐津波工学」の最終回として、今後の課題と展望を論じた。そこでは、技術的課題とともに、戦略的意味を持つ包括的課題をも重視した。

今後の取り組みとして、本稿に示した包括的課題の実践が重要と考える。その一環として、多分野間の協働の枠組みを地震安全の課題に展開する構想も進みつつある。今後も、一同心して建設的に進みたい。

「原子力安全の耐津波工学」構築に携わられた方々への

謝辞はシリーズ(その1)に述べたのでここでは反復しないが、この活動に参加頂いた方々の大いなる貢献に感謝して、むすびとする。

－ 参考資料 －

- 1) 日本地震工学会：原子力安全のための耐津波工学－地震・津波防御の総合技術体系を目指して－，原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会報告書，2015.3.
(<http://www.jaee.gr.jp/jp/2015/02/17/5894/>)
- 2) 亀田弘行：原子力安全における工学の責任，保全学，Vol.14, No.2, p.1, 2015.7.

著者紹介

亀田弘行（かめだ・ひろゆき）－耐津波工学委員会委員長
京都大学名誉教授・電力中央研究所
(専門分野/関心分野)地震工学，地震・津波PRA，原子力安全の耐津波工学，ライフライン地震工学

今村文彦（いまむら・ふみひこ）－同副委員長
東北大学災害科学国際研究所
(専門分野/関心分野)津波工学，数値解析，自然災害科学

宮野廣（みやの・ひろし）－同副委員長
法政大学，AESJ 廃炉委委員長
(専門分野/関心分野)流体振動，原子力発電システム，システム安全

高田毅士（たかだ・つよし）－同シンポジウムWG主査
東京大学
(専門分野/関心分野)地震工学，リスク論，建築工学

成宮祥介（なるみや・よしゆき）－同編集WG主査
関西電力
(専門分野/関心分野)安全評価，PRA，リスクマネジメント，規格基準