

「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」報告会

主催：日本地震工学会

協賛：日本原子力学会・土木学会

2015年4月15日

東京大学弥生講堂 一条ホールにて

委員会成果の概要 ～総合技術体系を目指して～

亀田弘行(京都大学名誉教授、電力中央研究所名誉研究アドバイザー／委員長*)

今村文彦(東北大学災害科学国際研究所教授／副委員長*)

宮野 廣(法政大学大学院デザイン工学研究科客員教授／副委員長*)

高田毅士(東京学大学院工学系研究科建築学科教授／シンポジウムWG主査*)

成宮祥介(関西電力 マネージャー／編集WG主査*)

* 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」
における役割

発表内容(報告書第1章「総説」による)

1. 「耐津波工学委員会」の概要
2. 目指した目標
3. 成果の要点
4. 報告会の要領

1. 「耐津波工学委員会」の概要

= 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」(2012.9～2015.3)

= 「耐津波工学委員会」

(1) 直接の動機 = 2011東日本大震災における原子力発電所の挙動

(2) 委員会の目的

+ 原子力発電所の津波安全を確保するための工学的な方法論の体系化

+ 個別技術とシステム評価技術が的確に融合する技術体系の構築

+ 工学の責任の明確化

(3)多分野間連携の必要性(学術の責任)

- + 福島事故の主要な原因のひとつ:原子力安全に関し、学術分野における分野横断的視野の欠如
- + 地震工学、津波工学、原子力安全工学の分野横断的討議が不可欠
- + 「技術ガバナンス」(コラムA)の観点から重要

(4)委員会の運営体制

- + 学界間の協働: 日本地震工学会に設置／日本原子力学会標準委員会との密接な協力のもとに企画・運営
- + 背景: 2008年以降の日本地震工学会と日本原子力学会の協力関係
- + 土木学会: 原子力土木委員会津波評価小委員会の協力
- + 委員長と2名の副委員長: 地震工学(亀田)、津波工学(今村)、原子力安全工学(宮野)の専門家
- + 幹事・委員の構成: これら3分野の専門家を配置、多分野が連携して討議を行う体制
- + 外部への発信・意見収集:
 - ・2014.3.20 原子力安全のための耐津波工学に関するシンポジウム
 - ・2014.12.6 第14回日本地震工学シンポジウム特別セッション
 - ・2015.3.20 日本原子力学会春の年会企画セッション

「原子力安全のための耐津波工学体系化に関する調査委員会」名簿（2015年1月現在）

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 委員名簿

委員長	亀田弘行（地震工学）	京都大学／電力中央研究所
副委員長	今村文彦（津波工学）	東北大学災害科学国際研究所 災害リスク研究部門
	宮野 廣（システム工学）	法政大学大学院デザイン工学研究科
幹事	糸井達哉（地震工学）	東京大学大学院工学系研究科 原子力国際専攻
	蛸澤勝三（リスク論）	電力中央研究所
	香月 智（構造信頼性）	防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科
	越村俊一（津波工学）	東北大学災害科学国際研究所 災害リスク研究部門
	佐藤慎司（海岸工学）	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻
	高田毅士（リスク論） （シンポジウムWG主査）	東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻
	中村隆夫（原子力社会工学）	大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
	成宮祥介（リスク評価） （報告書編集WG主査）	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室
	松山昌史（海岸工学）	電力中央研究所地球工学研究所 流体科学領域
	平石哲也（海岸工学）	京都大学防災研究所 沿岸域土砂環境研究領域
	委員	安部 浩（原子力工学）
有川太郎（海岸工学）		（独）港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター
有賀義明（地震工学）		弘前大学大学院理工学研究科
飯田 晋（プラント運転管理）		東北電力株式会社 火力原子力本部 原子力部
岩淵 洋子（津波工学）		原子力規制庁 技術基盤グループ
桐本順広（PRA、故障分析）		電力中央研究所原子力技術研究所 原子力システム安全領域
庄司 学（ライフライン防災）		筑波大学システム情報系
杉野英治（津波工学）		原子力規制庁 技術基盤グループ
高橋郁夫（耐震工学）		清水建設株式会社 技術研究所 原子力技術センター
高橋智幸（津波工学）		関西大学社会安全学部 安全マネジメント学科
中埜良昭（耐震構造）		東京大学生産技術研究所
中村 晋（地震工学）		日本大学 工学部 土木工学科
奈良 博（電気工学）		株式会社東芝 電力システム社 原子力電気設計部
奈良林直（原子炉工学）		北海道大学大学院工學院 エネルギー環境システム専攻
西村裕一（地震学）		北海道大学大学院理学研究院 地震火山研究観測センター

	東川直樹	中部電力株式会社 発電本部 土木建築部
	藤田 聡（装置機器学）	東京電機大学工学部 機械工学科
	美原義徳（耐震設計）	鹿島建設株式会社 原子力部
	楊井 知啓（機械工学）	東京電力株式会社原子力設備管理部
	山田博幸（防災・リスク論）	電力中央研究所
顧問	柴田 碧（耐震安全の体系化）	東京大学名誉教授
	首藤伸夫（津波工学）	東北大学名誉教授
	平野光將（原子力安全工学）	電力中央研究所

2. 目指した目標

- * 原子力発電所の津波防御のための工学技術の把握
- * 地震・津波防御における深層防護とリスク論の位置づけの明確化
- * リスク論に基づく原子力発電所の地震・津波安全評価体系の明確化
- * 地震工学, 津波工学, 原子力安全工学の分野横断的討議をふまえた総合的視野の構築
- * 以上を包含する地震・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

(1) 原子力発電所の津波防御のための工学技術の把握

(主として／第4、5章(原子力安全工学)、第6章～第10章(津波工学))

- + 津波波源の形成, 津波伝播・遡上のシミュレーション, 津波が物体や構築物に及ぼす波力などに、すでに顕著な成果
- + 原子力発電所の構築物・系統・機器(SSC)の耐津波設計を行うための工学体系は未整備の状況であり、その構築が急務
= **本委員会の第一の動機**
- + 津波による作用の特徴: 浸水, 波力(波圧), 洗掘, 浮力, 揚力, 予期せぬ経路からの侵入など、多様な様相
- + 津波脆弱性の特徴: 電気品におけるクリフエッジ効果
- + 原子力発電所の津波に対する安全を確保するための工学的技術の体系は「耐津波工学」の中核をなすとし、その具体的方法論を明らかにする
- + 個別技術の検討においては津波の影響に的を絞る(地震動との複合効果は、問題提起にとどめる)

(2)地震・津波防御における深層防護とリスク論の位置づけの明確化(主として第2章)

- + 深層防護(Defence-in-Depth)の概念＝原子力発電所の安全の根幹を担う思想として確立
- + 原子力発電所が持つ大きな潜在リスクへの認識
 - ⇒ 炉心損傷を起こさせず, 例え起こっても外部への放射性物質の放出とそれによる原子力災害のリスクをいかに小さくするか
 - ⇒ 多層の防護機能をプラントシステムに持たせる思想
- + 計画・設計段階における多様な技術的方策 ⇒ 例:「設計基準事故」(内的事象)

- + 外的事象(特に地震・津波)で注意すべき事項:「共通原因故障」/「フロントシステム」~「サポートシステム」の機能喪失 / 地震・津波ハザードが持つ大きな不確定性に / 多様な事故シナリオを考慮する必要これはPRA(確率論的リスク評価)によるシステムリスクの評価を要請
- + リスク評価の過程と結果の情報
 - ⇒ 深層防護の具体的方策決定に重要な意味 ⇒ 設計段階(深層防護レベル1~3)と, AM/SAM(深層防護レベル4)および防災・減災(深層防護レベル5)にフィードバック
 - ⇒ 深層防護全体をバランス良く実現するための重要な評価手段
- + **耐津波工学の共通基盤**として, 深層防護とリスク論の統合的位置づけを明確にすること
- + **原子力安全、地震工学、津波工学の専門家が、共通認識に到達するまで討議を重ねること(ブレインストーミング)が必須であり、委員会としての最重点課題**

(3)リスク論に基づく原子力発電所の地震・津波安全評価 体系の明確化(主として第3章)

- + 福島第一事故の一義的な原因が津波に対する「設計外外力」への考慮の不足であったことは明らか
- + 自然外力が持つ大きな不確定性 ⇒ 外力が設計基準を超える領域における安全担保の問題 ⇒ リスク論に基づく意思決定の枠組みが根幹となる
- + 規制基準では2006耐震指針において「残余のリスク」として位置づけられた
- + 設計とリスク評価は、実務においては分離されてきたが、両者の間にフィードバックの関係を成立させることにより、原子力安全確保の体系が完結すると考えるべき
- + 深層防護の各レベル(各層)とリスク論の連携の明確化

原子力安全のための設計～リスク評価連携の枠組

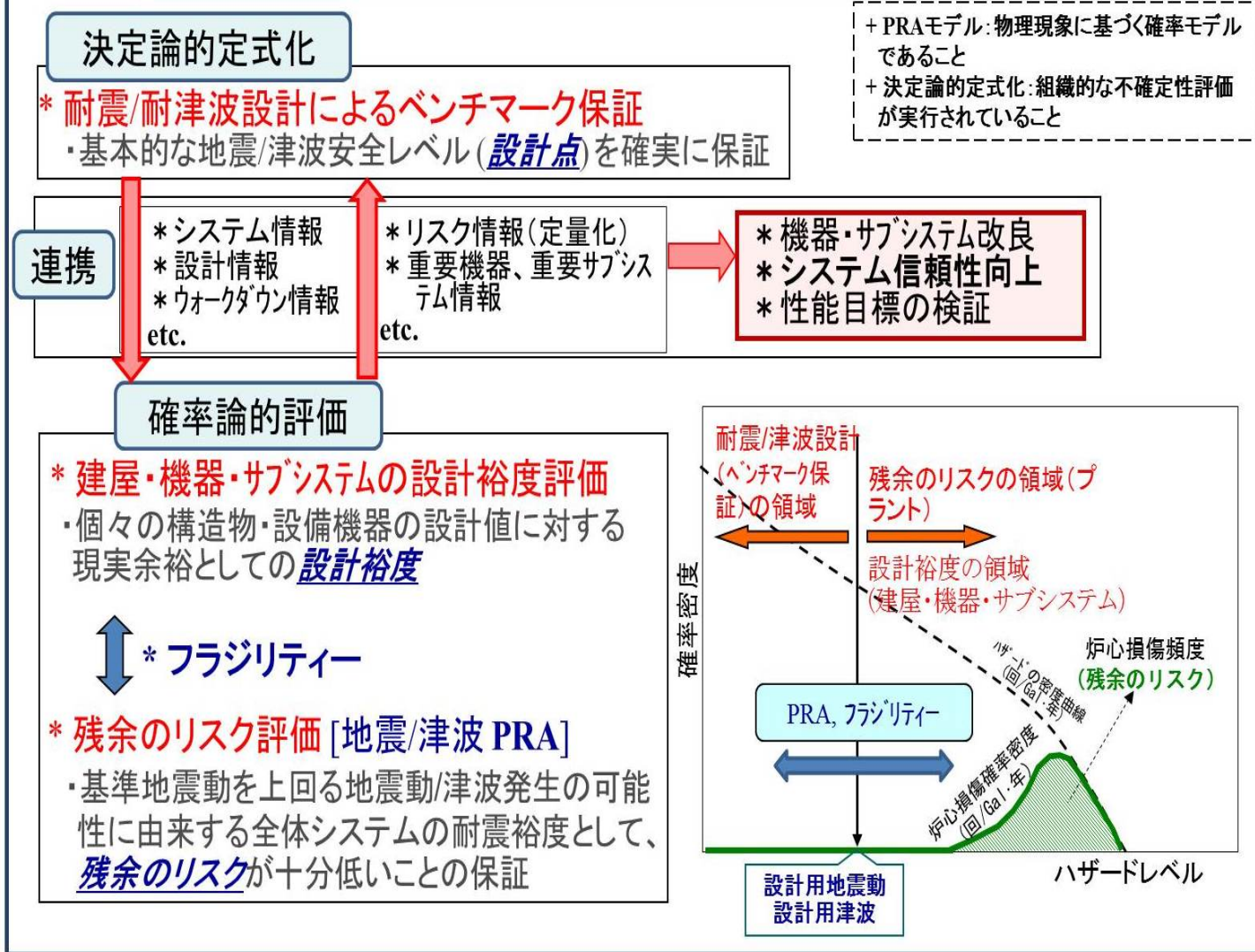


図1-1 原子力発電所の地震・津波安全のためのリスク論の位置づけ

(4)地震工学, 津波工学, 原子力安全工学の分野横断的 討議をふまえた総合的視野の構築

- + 分野を横断する討議は必ずしも容易ではなく, 真の意味のブレインストーミングが必要
- + 学理と現場がシームレスに連携する体系とすることが不可欠
／委員構成は大学・学術研究機関, 電力事業者, ゼネコン,
そして電気協会や原子力規制庁の関連技術者を網羅
- + 討議では, 組織の利害を代表することを目的とせず, 「事実」と「論理的整合性」を重んずる学術的な視点に徹するという合意のもとに活動

(5)以上を包含する地震・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

+ (3. で詳しく説明)

3. 成果の要点

(1) 報告書の総合性

序

1. 総説

2. 地震・津波工学に求められる原子力安全の基本事項

3. リスク論に基づく地震・津波防御の体系

4. 原子力発電所の地震・津波事故シナリオ

5. 原子力発電所の津波安全に関する性能

6. 津波の作用

7. 津波防御に関する工学的な方法

8. 津波フラジリティ解析

9. 施設周辺地域における防災・減災対策の推進

10. 耐津波工学関連の解析コード

11. 耐津波工学の課題と展望

コラム(A~N)

むすび

執筆者一覧

付録(名簿、委員会記録、柴田顧問メッセージ)

English Summary

【全体の枠組】

【耐津波安全の基本要素】

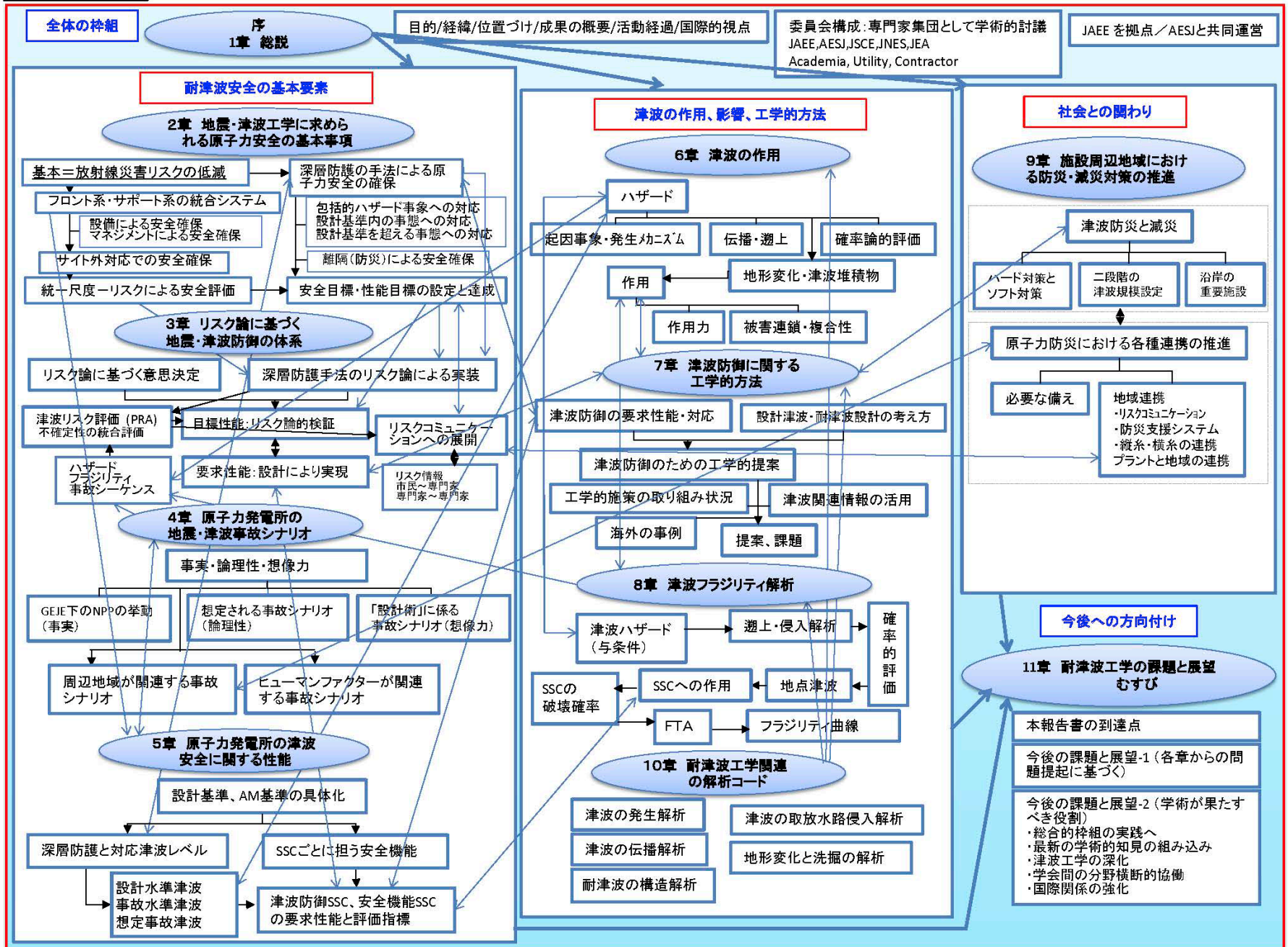
【津波の作用、影響、工学的な方法】

【社会との関わり】

【今後への方向付け】

【資料】

各章間の関係





JAEE



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—

Tsunami Resistant Engineering for Nuclear Safety

—Toward an Integrated Framework for Earthquake-Tsunami Protection—

2015年3月
March 2015

(編集)

公益社団法人 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)

一般社団法人 日本原子力学会 標準委員会

Compiled by
Committee on Tsunami Resistant Engineering for Nuclear Safety,
Japan Association for Earthquake Engineering (JAEE)
In cooperation with
Standards Committee, Atomic Energy Society of Japan (AESJ)

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

執筆者一覧 (多分野の協働: 地震工学・リスク論、津波工学、原子力安全工学)

序	亀田弘行, 今村文彦, 宮野 廣
1. 総説	亀田弘行*, 安部 浩, 松山昌史, 糸井達哉, 宮野 廣, 高田毅士, 成宮祥介
2. 地震・津波工学に求められる原子力安全の基本事項	宮野 廣*, 亀田弘行, 高田毅士, 成宮祥介, 糸井達哉
3. リスク論に基づく地震・津波防御の体系	高田毅士*, 糸井達哉, 亀田弘行, 宮野 廣, 蛭澤勝三
4. 原子力発電所の地震・津波事故シナリオ	蛭澤勝三*, 中村隆夫*, 宮野 廣, 成宮祥介
5. 原子力発電所の津波安全に関する性能	成宮祥介*, 宮野 廣, 飯田 晋
6. 津波の作用	越村俊一*, 松山昌史, 藤間功司, 杉野英治, 高橋智幸, 西村裕一, 有川太郎, 中埜良昭, 庄司 学, 岩淵洋子
7. 津波防御に関する工学的的方法	今村文彦*, 飯田 晋, 石黒幸文, 有賀義明, 東川直樹, 高橋郁夫, 庄司 学, 奈良林 直, 飯塚雅之**
8. 津波フラジリティ解析	香月 智*, 有川太郎, 桐本順広, 庄司 学, 奈良 博, 日高慎士郎, 美原義徳
9. 施設周辺地域における防災・減災対策の推進	佐藤慎司*, 藤間功司, 有川太郎, 高橋智幸, 松山昌史, 山田博幸
10. 耐津波工学の解析コード	松山昌史*, 平石哲也
11. 耐津波工学の課題と展望	亀田弘行*, 今村文彦, 成宮祥介, 宮野 廣, 高田毅士
コラム A 技術ガバナンス	亀田弘行, 宮野 廣
コラム B ハザード	成宮祥介
コラム C 深層防護の役割と効用	宮野 廣
コラム D 多様性・多重生・独立性	成宮祥介
コラム E ALARPの考え方について	成宮祥介
コラム F 原子力分野におけるリスクの使われ方	糸井達哉
コラム G 不確定性概念と用語の整理	糸井達哉
コラム H 事故シナリオと事故シーケンス	中村隆夫
コラム I 過酷事故とシビアアクシデント	成宮祥介
コラム J SSC	成宮祥介
コラム K 作用(Action)	香月 智
コラム L 各種津波対策において設定する津波について	今村文彦, 杉野英治, 宮野 廣
コラム M ドライブサイト	今村文彦, 亀田弘行
コラム N 浸水、冠水、湛水等について	松山昌史
むすび	高田毅士
English Summary	亀田弘行*, 宮野 廣, 高田毅士, 蛭澤勝三, 中村隆夫, 成宮祥介, 越村俊一, 今村文彦, 香月 智, 佐藤慎司, 松山昌史

注1) *印: 各章主査 / 注2) **印: 執筆協力者

(2)コラムの作成

- + 多分野で討議していると、同じ概念を異なる用語で表現したり、同じ用語を異なる概念で用いたり、ずれがある場合などがある。
- + 討議で現れたこれら事例のうち、重要な用語・概念につき、報告書の本文とは別に、各1ページのコラムを作成した。
- + これにより、分野間交流の円滑化を図った。
- + 解説だけでなく、委員会独自の提案を含むものもある。

コラム

- コラムA 技術ガバナンス
- コラムB ハザード
- コラムC 深層防護の役割と効用
- コラムD 多様性・多重性・独立性
- コラムE ALARPの考え方について
- コラムF 原子力分野でのリスクの使われ方
- コラムG 不確定性概念と用語の整理
- コラムH 事故シナリオと事故シーケンス
- コラムI 過酷事故とシビアアクシデント
- コラムJ SSC
- コラムK 作用(Action)
- コラムL 各種津波対策において設定する津波について
- コラムM ドライサイト
- コラムN 浸水、冠水、湛水等について

<コラムA> 技術ガバナンス

原子力安全を確立するためには、政策的、経営的、および技術的基盤を体系的に結びつけた取り組みが重要である。その基盤となるのが技術であることは言うまでもない。技術に真摯に向き合い、技術に基づいた適切な判断を行うことこそ最も優先させなければならない。それが技術ガバナンスである¹⁾。そのためには、科学者、技術者は適切に判断のための情報を示さなければならない。それが科学者、技術者の原子力安全を確保するための重要な責務である。その上で、原子力安全は技術的な判断だけでは成り立たないことを自覚し、他の要素を有機的に結びつけ、それらを有効に機能させる枠組として、リスクガバナンスの確立が不可欠となる。リスクガバナンスとは、「様々な脅威(リスク)に対する問題解決の行為における能動的参加者と責務、規則と約束事、意思決定の構造、情報の蓄積・解析・開示・運用、のすべてを有機的に包含し有効に機能する仕組みの総体」と規定される²⁾。ここでは、リスクマネジメントやリスクアナリシスなどの手順に加え、能動的参加者(ステークホルダー)の役割が積極的に位置づけられていることが必須とされる。すなわち、原子力安全においては、それはトータルな運営体制の問題であり、特に自然ハザードに対する安全において不備があったことが福島第一事故の重要な要因として指摘されている³⁾。技術ガバナンスは、リスクガバナンスを支える不可欠の柱である。

原子力安全を具体的に実現する手段として、工学技術はその中核をなす。これまでに実現された個別要素技術および総合化技術は膨大であり、その集積のうえに原子力発電所が存在している。しかし、リスクガバナンスが重要課題とされる中で、工学の役割は「正しい技術」を持つだけでは果たされない。それ以上に、「技術を正しく適用する」ことが必須である。リスクガバナンスの包括的な枠組の中で、技術的価値を発揮させねばならない。この点で、技術ガバナンスを担うべき工学の責任は大きい。

本報告書は、原子力安全の課題を、「耐津波安全の基本原則」、「津波の作用・影響・工学的方法」、「社会との関わり」から、総合的に扱ってきた。それは、技術ガバナンスの概念と軌を一にするものである。

参考文献

- 1) 亀田弘行、高田毅士、蛭沢勝三、中村晋：原子力災害の再発を防ぐ(その3) —地震工学分野から原子力安全への提言—、日本原子力学会誌、Vol. 54, No. 9, pp.29-37, 2012.9.
- 2) 宮野廣：技術ガバナンスとトータルデザイン、学術の動向、Vol.20, No.2, 日本学会会議, pp.68-71, 2015.2.
- 3) Ortwin Renn: Risk Governance towards an Integrative Approach, IRGC White Paper No.1, International Risk Governance Council, September 2005.
(http://irgc.org/IMG/pdf/IRGC_WP_No_1_Risk_Governance_reprinted_version.pdf)
- 4) 首相官邸原子力災害対策本部：原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—, 2011.6.
(http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html)
- 5) 国会事故調(東京電力福島原子力発電所事故調査委員会)：調査報告書, 2012.6.

<コラムL> 各種津波対策において設定する津波について

行政や事業者は、住民や施設の津波対策において想定する津波を設定する。ある想定に沿って波源を想定し対象地点での津波による作用(水位、浸水域、流体力等)を推計する方法が一般的であり、これらの推計結果は津波対策の資料として活用される。分野によって以下の用語が用いられる。

【計画津波】

ハードとソフトを含めた総合津波対策を計画するための津波であり、東日本大震災では、国土交通省などが「津波防災まちづくりの計画や避難計画の策定のための津波」(参考：津波防災まちづくりの計画策定に係る指針¹⁾)などに明記)とされている。

【設計津波】

「海岸保全施設である海岸堤防等の設計に必要となる津波」となり、ハード中心とした津波対策を検討する際の津波である。同様に、東日本大震災では、レベル1・2などを対象として、国土交通省「設計津波の水位の設定方法等²⁾」を提案している。

【基準津波】

原子力規制委員会が東日本大震災以降、平成25年に制定した新規制基準³⁾の用語であり、「設計基準対象施設の供用中に当該施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波」とされる。基準津波は、施設からの反射波の影響が最少となるよう、施設から離れた沿岸域で定義され、設計基準対象施設位置で定義される津波(同規制基準では、これを入力津波と呼び、上述の設計津波とほぼ同義である。)とは明確に区別されている。

【想定津波】

対策、計画、設計など実施をする際に想定すべき(検討すべき)津波であり、定義の範囲が広い。

以上は一般的に用いられる用語であるが、本報告書では深層防護との関連で、原子力発電所を対象に、以下の呼称を提案している。

【設計水準津波 (Design Tsunami)】

異常発生防止用SSC設計のための設計津波(深層防護レベル1に対応)

【事故水準津波 (Accident-Control Tsunami)】

異常検知用または設計基準内への事故の制御用のSSC設計のための設計津波(深層防護レベル2, 3に対応)

【想定事故津波 (Severe-Accident Tsunami)】

アクシデントマネジメント策および原子力防災の有効性評価のような設計基準を超える想定津波(深層防護レベル4, 5に対応)

ここで、設計津波(SSC設計用の想定津波)は、「設計水準津波」と「事故水準津波」2種類から構成されるべきとするものである。

参考文献

- 1) <http://www.mlit.go.jp/common/001000488.pdf> (2014.7.3参照)
- 2) http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000361.html (2014.7.3参照)
- 3) https://www.mlit.go.jp/river/shingikai_blog/kasentsunamitaisaku/dai02kai/dai2kai_ref4.pdf (2014.7.3参照)
- 4) <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H25/H25F31901000005.html> (2014.7.3参照)

(3) 将来展望の提起(第11章)

- i) 本報告書の到達点
= 目標5項目に関する検証
- ii) 今後の課題と展望～1(各章からの問題提起に基づく) /
(技術課題)
 - a) 耐津波安全の基本要素に関する事項
 - b) 津波の作用, 影響, 工学的方法に関する事項
 - c) 社会との関わりに関する事項
- iii) 今後の課題と展望～2(学術が果たすべき役割) /
(戦略的課題)
 - a) 耐津波原子力安全確保の実践に向けた学術の役割
 - b) 最新の学術的知見の組み込み
 - c) 原子力安全のための津波工学の深化
 - d) 学会間の分野横断的協働
 - e) 国際関係の強化

(4)モノの形を取らないが将来への重要な資源

+ 分野間討議の経験＝宝物

+ お客様扱いではなく、不毛な対決でもなく、真の意味のブレーストーミングを実践したこと

+ ブレーストーミングの要諦3箇条

i) 向上心が中核にあるという相互信頼

ii) 「面子」に拘って発展的討議の腰を折らない

iii) 質的向上が達成されたと互いに納得し確認するまで討議を投げない

+ 共感に基づくヒューマンネットワーク

+ 学会という組織間で蓄積された実績の重要性

+ 今後に活かすべき

4. 報告会の要領

プログラム構成

- 1) 開会挨拶、関連学会長挨拶
- 2) 委員会成果の概要－総合技術体系を目指して(亀田)
- 3) 招待講演:「自然災害対策としての津波防災」(首藤先生)
- 4) 耐津波安全の基本原則(4件)
(第2章～第5章関連:宮野、高田、蛭澤、成宮)

休憩 (昼食)

- 5) 13:10～14:30 津波の作用、影響、工学的な方法(4件)
(第6章～第8章、第10章関連:越村、今村、香月、松山)
- 6) 14:30～15:10 社会との関わり(2件)
(第9章関連:佐藤、山田)

休憩 (15分)

7) パネルディスカッション「耐津波工学の実践と課題」

(コーディネーター: 今村・宮野)

* 耐津波工学の課題と展望(第11章)紹介(亀田)

* パネリスト: 吉村 忍(日本電気協会)

山口 彰(日本原子力学会)

香山弘文(経済産業省)

高橋智幸(土木学会)

亀田弘行(日本地震工学会)

8) 閉会挨拶

9) 懇親会

「序」の末尾

- * 当委員会の成果:「原子力安全の耐津波工学」構築の第一歩を踏み出した段階
- * 今後の取り組み:個別技術課題 & 戦略的課題を提起
- * ここでは耐津波工学を対象に工学が果たすべき責任を議論: 今後は他の自然災害に視野を広げ, 方法論的にも深耕すべき

ご静聴有り難うございました
活発な討議を期待します