

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 報告会

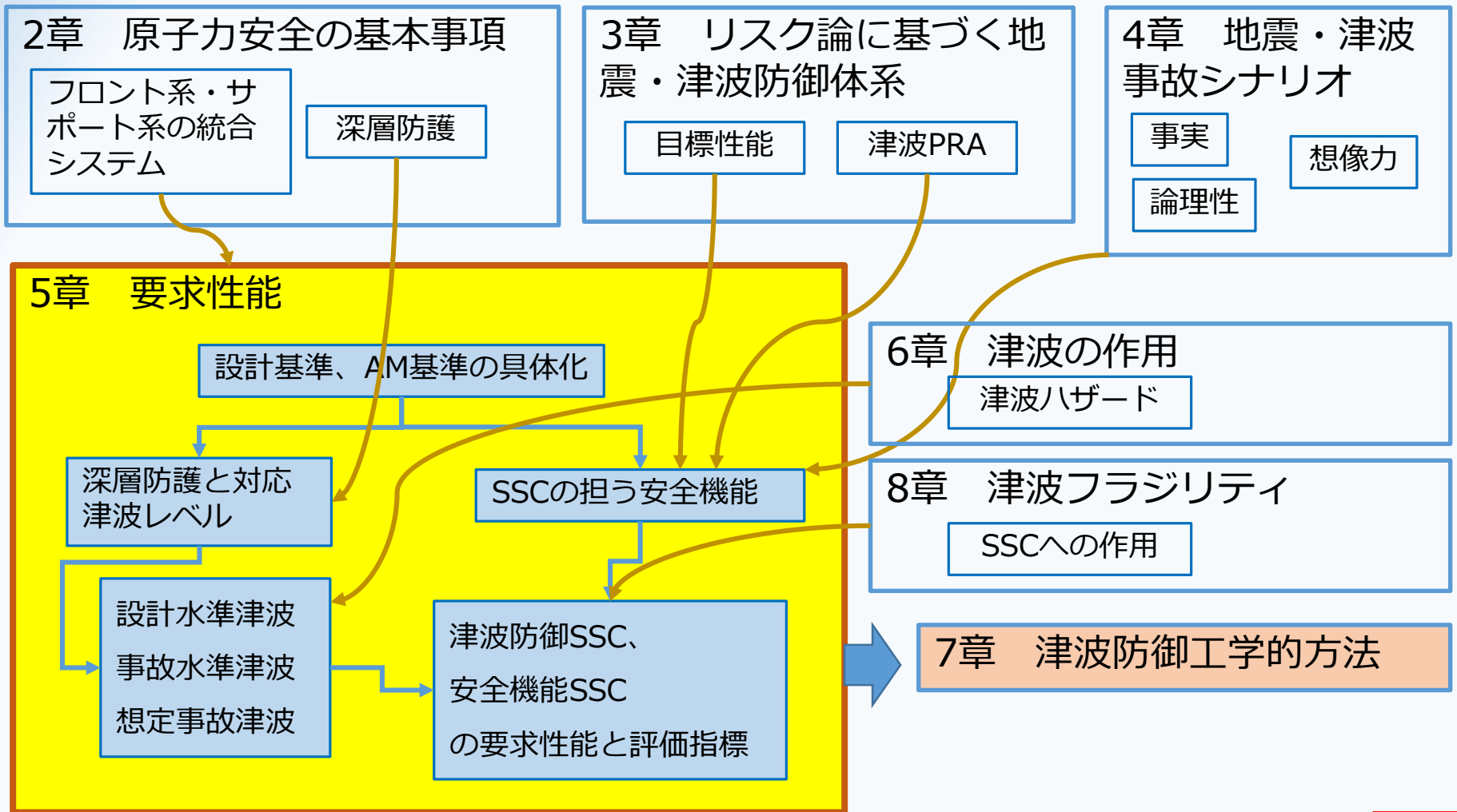
# 5章 原子力発電所の 津波安全に関する要求性能

2015年4月15日  
成宮祥介（関西電力）

# 報告内容

- 5章の位置づけ
- 基本となる考え方
- 安全機能とSSC
- 事故シナリオでのSSCの役割
- SSCの確保すべき性能
- 要求性能の組み合わせに係る考察
- まとめ

# 5章の位置づけ



# 基本となる考え方(1/2)

- リスク論で設計基準を定め、**設計基準を超える津波が発生することを前提**にその場合のアクシデントマネジメント(AM)策を中心とした対応を検討しておくこと
- 津波特有の**不確定性は安全余裕と深層防護で対処**すること
- 津波により広範囲の共通要因故障が発生するというクリフエッジの顕在化によりプラントが過酷事故へ進展することを抑えるように**緩和対策も重視**すること

設計基準を超える津波を想定するが、設計基準の津波に対して防御を怠ることはない。

津波PRAは不確定性を定量化するが大きくなってしまふ。しかし、それゆえ活用しないのではなく、相対的な重要度などの知見は得られる。

津波により起因事象が発生してしまっても、その事象を過酷事故に進展させない緩和策があればよい。その緩和策に属する設備を津波から防御することが必要。

# 基本となる考え方(2/2)

## 深層防護レベル1～3

耐津波設計基準：津波の作用によりSSCの機能が失われ、その結果として過酷事故に至る事態にならないこと

- ① 津波の作用の程度：津波強度(例えば津波高)と発生確率
- ② 作用によりSSCに発生する影響：没水、波力、洗掘他
- ③ 想定される影響を防止・緩和する要求性能：津波防御SSCと安全機能SSC
- ④ 津波作用の状態とSSCとの組み合わせ：深層防護の「レベルの信頼性確保」「レベル間のバランス」「独立の効果」

## 深層防護レベル4

津波のAM策は、共通原因事象を広く引き起こすことに対して、柔軟に可搬、転用、などが求められる。

- ① 設計基準を超える津波の来襲を前提に深層防護レベル4で対処
- ② 過酷事故を緩和するSSCを津波作用から防護
- ③ 津波作用の不確定性をAM策の柔軟性で対処

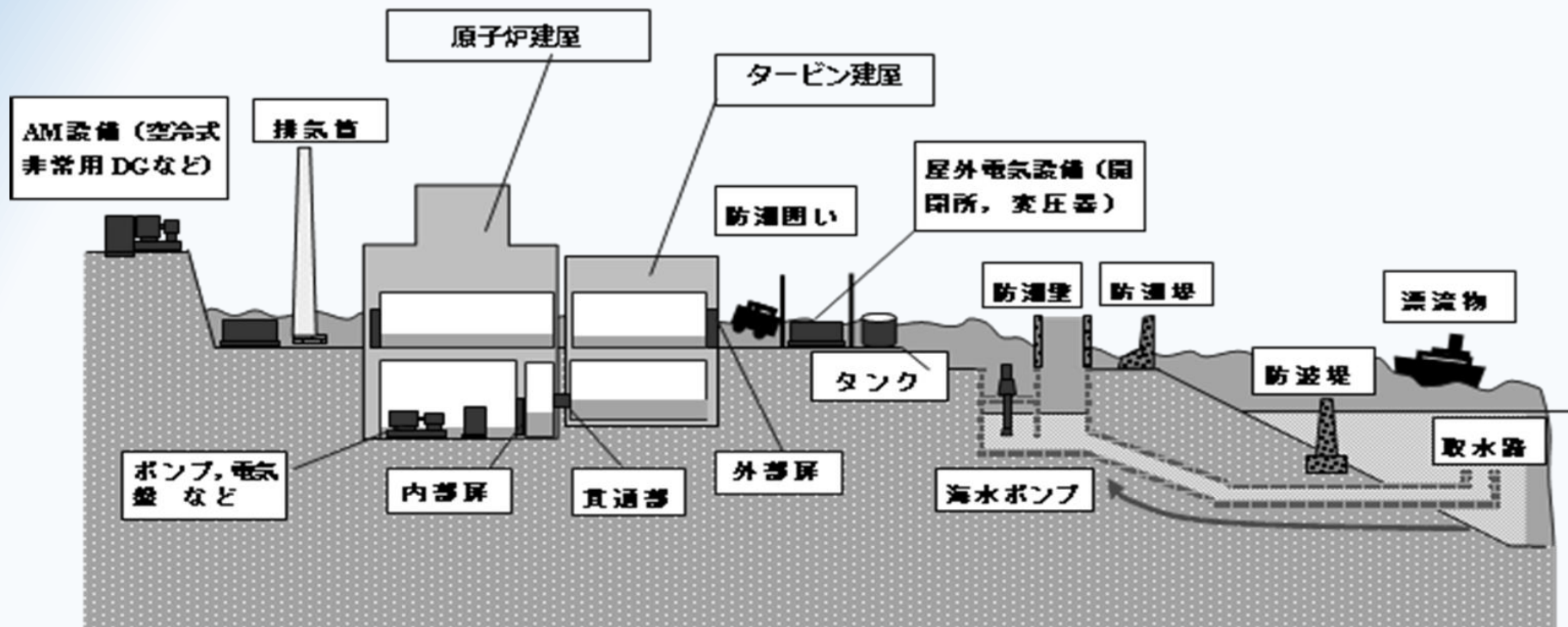
# 安全機能とSSC (1/2)

機能	サブ機能	SSC	
		PWRの例	BWRの例
バウンダリ機能	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	バウンダリを構成する機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く)	バウンダリを構成する機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く)
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	加圧器安全弁(開機能)	SR弁の安全弁機能
	放射性物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器, アニュラス, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ系, アニュラス空気再循環設備 安全補機空気浄化系, 可燃性ガス濃度制御系	PCV, PCV隔離弁, PCVスプレイ冷却系, FCS R/B, SGTS, 非常用再循環ガス処理系(関連系)排気筒(SGTS排気管支持機能)
冷却機能	炉心形状の維持機能	炉心支持構造物, 燃料集合体(ただし, 燃料を除く)	炉心支持構造物, 燃料集合体(ただし, 燃料を除く)
	原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統, 余熱除去系, 補助給水系, SG2時側隔離弁までの主蒸気系・給水系, 主蒸気安全弁, 主蒸気逃がし弁(手動逃がし機能)	残留熱を除去する系統, RHR系, RCIC系, HPCS系, SR系(逃がし弁機能), 自動減圧系(手動逃がし機能)
	炉心冷却機能	非常用炉心冷却系: 低圧注入系, 高圧注入系, 蓄圧注入系	ECCS: RHR系, HPCS系, LPCS系, ADS

# 安全機能とSSC (2/2)

機能	サブ機能	SSC	
		PWRの例	BWRの例
制御機能	過剰反応度の印加防止機能	制御棒駆動装置圧力ハウジング	CRカップリング
	原子炉の緊急停止機能	原子炉停止系の制御棒による系	スクラム機能
	未臨界維持機能	原子炉停止系	CR/CRD系
			SLC系
安全機能を動かすための機能	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系	安全保護系
	安全上特に重要な関連機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非常用所内電源系</li> <li>・ 制御室及びその遮へい</li> <li>・ 換気空調系</li> <li>・ 原子炉補機冷却水系</li> <li>・ 直流電源系</li> <li>・ 制御用圧縮空気設備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非常用所内電源系（関連系） DG 燃料輸送系, DG冷却系</li> <li>・ 制御室及びその遮へい・ 非常用換気空調系</li> <li>・ 非常用補機冷却水系</li> <li>・ 直流電源系</li> </ul>

# 津波作用とSSCの配置



- 1) 浸水による作用 (設備の没水、被水)
- 2) 波の力による作用 (波力、洗掘、浮力)
- 3) 取水障害 (海底砂移動、引き波による水位低下)
- 4) 漂流物の発電所設備への衝突による作用

安全機能  
SSC

津波防御  
SSC



# 津波防御SSCへの作用モード

津波防御SSC	浸水	波の力			取水障害		漂流物 衝撃力
	被水・没水	波力	洗掘	浮力	海底砂移動	水位低下	
敷地高さ	○	○	○	-	-	-	○
防波堤	○	○	○	○	-	-	○
取水路構造	○	○	○	○	○	○	○
防潮堤	○	○	○	○	-	-	○
防潮堤排水機構	○	○	○	-	-	-	○
機器設置高さ	○	○	-	-	-	-	-
建屋開口部高さ	○	○	-	-	-	-	-
建屋水密扉	○	○	-	-	-	-	○
機器室水密扉	○	-	-	-	-	-	-
フラップゲート	○	○(屋外)	-	-	-	-	○(屋外)
機器周囲の防潮囲い(防水壁)	○	○(屋外)	○(屋外)	○(屋外)	-	-	○(屋外)
貫通部止水対策	○	○(屋外)	-	-	-	-	○(屋外)
排水設備	○	○(屋外)	○(屋外)	○(屋外)	-	-	○(屋外)

# 津波事故シナリオ

## 津波に対する防御

- \* 津波の作用で起因事象を発生させてしまうSSCを護る
- \* 起因事象が発生してもその事故進展を止める（事故を緩和）SSCを護る

空間的要因	敷地内外(考慮すべきSSCの位置)	取水口	屋外				屋内		機器			津波事故シナリオ番号
			外部からの浸入(防潮堤・防波堤・敷地高さ等)		内部からの浸入(取水ピット壁、海水管ダクト、地下見逃し水道等)		外壁(設置高さ・水密扉・貫通ダクト目地・開口部高さ等)		内壁(水密扉・貫通ダクト目地等)	設置高さ・機器周囲の防潮囲い(防水壁)・排水設備		
津波による作用	—	取水障害(海底砂移動・水位低下等)	浸水(被水・没水・越流)	波の力・漂流物衝撃力	浸水(被水・没水・越流)	波の力・漂流物衝撃力	浸水(被水・没水)	波の力・漂流物衝撃力	浸水(被水・没水)	浸水(被水・没水・越流)	波の力・漂流物衝撃力	
												R1
												R2
												R3
												R4
												R5
												R6
												R7
												R8
												R9
												R10
												R11~R21
												R22~R32
												R33~R43
												R44~R86
河川・河川堤防・トンネルの有無の津波経路への影響を考慮し、例えば送電線等の敷地外設備への作用の有無を考える。 敷地内に到達した場合は、敷地内のフローと同様の経路展開。												R87

# 津波事故シナリオの例

報告書では、サイトへの津波浸入経路、並びに、事故進展を緩和する設備と津波防御策の有無との組み合わせ、からイベントツリー（樹形図）で記載し、さらにシナリオで登場するSSCを表に整理した。

ここでは、2例を紹介する。

注意！ これらは浸水経路と設備の機能喪失をあくまで仮想的に記載しているだけで、実際のプラントでは、設備の津波防御状況（防水壁や水密扉、設備の設置高さなど）や設備の機能の多重化・多様化などにより、事故シナリオを描くこととなる。

## R2：津波

- 海水管ダクト、地下見逃し水道（みずみち）などからの敷地内への浸水
- しかし、建屋外壁の水密扉などが効を奏して建屋内へは浸水せず
- ⇒屋外の機器で防水壁などの対策が無いものが機能喪失

## R10：津波

- 海水管ダクト、地下見逃し水道（みずみち）などからの敷地内への浸水
- さらに、建屋外壁の水密扉などが波力、漂流物衝突により浸水
- さらに建屋内の機器室壁の扉から浸水
- 室内の機器は設置高さ不足、防水壁無しなどにより作用を受けた
- ⇒屋外の機器で防水壁などの対策が無いものが機能喪失
- ⇒建屋内の機器は機能喪失

# SSCの確保すべき性能（1/3）

## 津波防御SSC

分類	設置場所	SSC名称	耐津波性能	評価項目
津波浸入防護施設	屋外	防潮堤（沿岸域）	• 津波に対して越波を起こさないこと。	• 高さ
			• 津波による波力で、倒壊しないこと。	• 強度, 安定
			• 防潮堤の内側に浸水させないこと, 又は浸入量を低減できること。	• 高さ
		防波堤（海域）	• 来襲した津波の高さを低減できること。	• 高さ
			• 来襲した津波のエネルギーを低減できること。	• 強度, 安定
			• 津波により全体あるいは一部が破壊され、漂流物とならないこと。	• 強度
		敷地高さ	• 敷地での津波の浸水深を低減できること。	• 高さ
			• 敷地での津波のエネルギーを低減できること。	• 強度

# SSCの確保すべき性能（2/3）

## 津波防御SSC

分類	設置場所	SSC名称	耐津波性能	評価項目
浸水防止設備	屋外	<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋設置面高さ</li> <li>建屋開口部高さ（ダクト等）</li> <li>建屋・水密扉</li> <li>機器周囲の防潮囲い（防水壁）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波の最大高さにおける静水圧に耐えられること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>来襲した津波の波力・流体力により倒壊しないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度, 安定</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋内に水を浸入させない, 又は浸入量を低減できること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>止水</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>漂流物からの衝撃により, 上記の性能を損失することがないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度</li> </ul>
	屋内	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器室・水密扉</li> <li>機器周囲の防潮囲い（防水壁）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波の最大高さにおける静水圧に耐えられること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>機器室内に水を浸入させない, 又は浸入量を低減できること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>止水</li> </ul>
津波監視設備	屋外	<ul style="list-style-type: none"> <li>取水ピット水位計</li> <li>津波監視カメラ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波監視設備は, 被水・没水したとしても, 津波監視機能を継続できること</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐水</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>津波監視設備は, 交流電源を喪失したとしても, 津波監視機能を継続できること</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>津波の波力により倒壊あるいは監視機能の喪失に至らないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度</li> </ul>

# SSCの確保すべき性能 (3/3)

## 安全機能SSC

分類	場所	SSC名称	耐津波性能	性能確保の対策 (例)
海水系	屋外	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水ポンプ</li> <li>現場操作箱</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>引き波により、キャビテーションを起こさないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取水位置の工夫【深さ】</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>浮遊砂により、ローターの回転が妨げられないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ストレーナー, 異物排出溝【粒径】</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>モーター部に被水しないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>位置【高さ】</li> <li>防水壁【止水】</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>波力により倒壊しないこと, あるいは海水送水機能が喪失しないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>防水壁【強度】</li> </ul>
補助給水系	I/B	<ul style="list-style-type: none"> <li>タービン動補助給水ポンプ・起動盤(P)</li> <li>電動補助給水ポンプ(P)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋内に津波が浸入した場合, 浮遊砂によりローターの回転が妨げられないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ストレーナー, 異物排出溝【粒径】</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋内に津波が浸入した場合, モーター部に被水しないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>位置【高さ】</li> <li>防水壁【止水】</li> </ul>
	屋外	<ul style="list-style-type: none"> <li>復水タンク(P)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波による波力により防水壁が損傷しないこと。</li> <li>津波が敷地内に浸入した場合没水しないこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>防水壁【強度】</li> <li>位置【高さ】</li> <li>防水壁【止水】</li> </ul>

# 要求性能の組み合わせに係る考察

- 原子カプラント全体の耐津波の安全を確立するには、そのサイトの津波到達レベルと深層防護の各レベルの関係をみて、SSCの組み合わせることが必要。
- 深層防護レベル1：設計基準津波  
深層防護レベル2,3：事故水準津波  
深層防護レベル4：想定事故津波

深層防護の各レベルはバランスが重要

津波ハザード解析結果は不確かさを伴っていることを考慮

例えば、

- 「設計基準津波」の不確かさの対処として防潮堤を余裕をもって設計
- 「事故水準津波」に対して越流すること、防潮堤が倒壊すること、見逃しみずみちなどの経路から浸水することを想定して、建屋水密性を確保
- 「想定事故津波」として、柔軟なアクシデントマネジメント策を備える。
- これらの策の性能が維持されるように、保全管理システムを整備し実行するマネジメントが必要。

# まとめ

- 津波ハザード解析には、不確実さが含まれる。これは対策の意思決定に大きな影響を与える。
- 不確実さの多寡により上記の性能の重要度を判断できれば良いが、そこまでの精度は難しい。今後の研究に期待。
- その「不確実さ」に対し、深層防護概念を実装した対処が重要で有効である。
- 本章では、事故シナリオの中で活躍するSSCの性能を描くプロセスを提示した。個々のSSCに丁寧に津波防御策を施すことだけでなく、プラント全体の安全をみて、総体としての性能を確立することが重要である。
- そして、施した性能を長い時間軸で維持していくこと、デマンド時に性能が適切に発揮できるようにマネジメントしておくこと、も忘れてはならない。