

耐津波工学の体系化に向けた活動の中間報告

**既存原子力発電所の地震・津波被害
からの教訓**

— 事故シナリオ、要求性能 —

2014年3月20日
成宮祥介(関西電力)

はじめに

- 本報告では、耐津波工学体系化委員会報告書の3章「原子力発電所の地震・津波事故シナリオ」と4章「原子力発電所の地震・津波安全に関する性能」の検討状況を紹介する。
- 3章では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による複数の原子力発電所の被害をまとめ、そこから事故シナリオを描く。
- 4章では、事故シナリオに登場する構築物、系統および機器(SSCE)の果たす役割を整理し、津波影響のレベルによりそれらの性能を明らかにした。
- SSCEごとの性能は、7章の津波防御の工学体系の検討に供せられる。

東日本大震災における原子力発電所の挙動

- 2011年3月11日14時46分頃、発生したM9.0の**東北地方太平洋沖地震**は、その後の津波とともに、東北地方太平洋岸に設置されていた、東京電力(株)福島第一原子力発電所の6基、第二原子力発電所の4基、東北電力(株)女川原子力発電所の3基及び日本原子力発電(株)東海第二発電所の1基の原子炉の、計14基に甚大な影響を及ぼした。
- **地震動の影響**: 福島第一、女川の原子力発電所では一部、地震観測記録による最大加速度が S_s に対する最大応答加速度を上回ったが、しかし、重要な機器の機能喪失は現在までの調査分析では認められておらず、耐震クラスB、Cの設備の一部の損傷にとどまった。
- **津波の影響**: 福島第一及び福島第二を襲った津波高さは、推定では、それぞれ約13m及び7~8m。さらに、これが敷地内を遡上して、浸水高さでは最高でそれぞれ15.5m、14.5mに達している。その結果、福島第一では、多くの設備の機能が同時に喪失し、出力運転中であった1~3号が炉心損傷に至り環境への大量の放射性物質放出という事態になった。敷地高さが高かった原子力発電所においても、女川では潮位計部から、東海第二では壁の貫通部からの浸水の事例があった。

東日本大震災における原子力発電所の挙動～地震動の影響

- 福島第一では、外部電源が送電鉄塔の倒壊や受電しゃ断器の損傷などにより全て喪失した。プラントパラメータの変化からは、原子炉圧力バウンダリには損傷は無く、主要安全機器にも損傷の可能性はほとんど無いと地震応答の再現解析から推定できる。
- 福島第二では、外部電源4回線のうち2回線の断路器又は避雷器の損傷により外部電源が喪失したが1回線は健全を維持した。原子炉施設については、安全上重要な設備には外観上の異常は見られなかった。
- 女川発電所においても、外部電源は5回線のうち1回線は正常であった。原子炉施設への影響としては、1号機で電源盤の火災がおき、起動用変圧器が停止したため、外部電源の供給ができなくなった。それ以外の安全上重要な設備は、津波来襲まで正常に機能していた。女川では、2005年の地震では観測値が当時のS1を超えたため、長期間プラントを止めて、耐震裕度向上工事を実施していたが、このような取組みが地震動による被害を少なくすることに資したと考えられている。
- 東海第二においては、外部電源3回線は全て喪失した。しかし、復旧が早く受電が完了し冷態停止を達成できている。原子炉施設の安全上重要な設備の地震動による損傷は見られない。

東日本大震災における原子力発電所の挙動～津波の影響

- 福島第一では、D/Gについては、1～4号機では全機が喪失、5号機及び6号機では6号機のB系のD/Gのみが健全だった。外部電源喪失後、D/Gの自動起動には成功したが、D/G本体の被水による影響に加えて間接的要因(補機冷却系、M/C等関連機器の水没)によっても機能が喪失している。直流電源は、1号機、2号機及び4号機では建屋内への浸水による被水、福島第一3号機では枯渇により喪失したが、5号機及び6号機では全系統が健全であった。海水系統は1～6号機全てで機能を喪失した。
- 福島第二では、多くの建屋で、漏洩、大物搬入口の破損、コンクリートダクト経由等による浸水があった。D/Gについては、1号機及び2号機では全て喪失、3号機では3系統のうち1系統が喪失、4号機では3系統のうち2系統が喪失した。直流電源の喪失はなかった。海水系統は1号機及び2号機で全て機能を喪失、3号機ではHPCSのD/Gは確保されたがRHR用は1/2系統が喪失、4号機でもHPCSのD/Gは確保されたがRHR用は機能を喪失した。
- 東北地方太平洋沖地震により生じた津波に対して主要敷地高さが高かった原子力発電所においても、女川では潮位計部から、東海第二では壁の貫通部からの浸水の事例があった。

設備被害状況一覧

サ/号機	外部電源	D/G (地震による喪失はなし)	直流電源	海水冷却系
福島第一/1	275kV : × 66kV : × (全7 回線)	×	×	×
福島第一/2		×	×	×
福島第一/3		×	○→枯渇	×
福島第一/4		×	×	×
福島第一/5		×	○	×
福島第一/6		1/3	○	×
福島第二/1	500kV : 1/2 66kV : × (全4 回線)	×	3/4	×
福島第二/2		×	○	×
福島第二/3		2/3	○	D/G(H)用 : ○ RHR 用 : 1/2
福島第二/4		1/3	○	D/G(H)用 : ○ RHR 用 : ×
女川/1	275kV : 1/4 66kV : × (全5 回線)	○	○	○
女川/2		1/3	○	D/G(H)用 : × RHR 用 : 1/2
女川/3		○	○	○
東海第二	275kV : × 154kV : × (全3 回線)	2/3	○	D/G 用 : 2/3 RHR 用 : ○

東日本大震災の被害からの教訓

- 安全確保において施設外誘因事象を考えることの重要性
 - n 様々な施設外誘因事象に対する防護設計を行うにあたって、設計基準としてどれほどのハザードを想定するのか、どこまでの防護設計を施すのか？
 - n 「考え得ることは徹底して考えてきめ細かい対策をすることが大事である。」
- 人の考えることの限界
 - n 適切な安全設計をすることは当然の前提として、「考え得ないことも起き得ると考えて柔軟な対策を用意する」ことも大事である。

東日本大震災の被害からの教訓

- 「従来から重要とされてきた安全の原則は、やっぱり重要であった」ということ
 - n 第一は、「深層防護(Defense in Depth)」の重要性。
 - n 「継続的改善(Continuous Improvement)」の重要性。
- 「設置者に第一義的責任」という原則
 - n 設置者が安全設計と日常的な安全管理に全責任を負っているのは当然として、重大な事象が発生したときの対応も大事である。現場のことは現場の人が一番よく知っており、また、地震や津波に限らず異常な状態に対して現場確認が原則である。異常状態が進展し深層防護の高次になればマネジメントの役割が大きくなり、より必要かつ期待される。設計を超える範囲においても、現場の状況を正確に把握し適切に対応することが、それ以上の異常状態の拡大を防止し、影響緩和に資し、事象の収束につながることを再認識する必要がある

事故進展に大きな影響を与える事項

- 福島第一原子力発電所事故及びこれまでに地震PRA、津波PRA等により得られた情報を基に想像力を駆使して事故シナリオを描きだし、津波を起因として事故進展に大きな影響を与える事項を整理した。
- サイト敷地内での単一号機でのSSCEsの機能喪失

(1)空間的事故進展シナリオにかかる事項	1) 防潮堤及び排水ゲート ・防潮堤の有無 ・防潮堤有の場合基準津波推移と防潮堤の高さとの関係 ・防潮堤無の場合敷地高さや取水ピット標高 ・排水ゲートの有無及び引き波による設計の考え方
	2)海水取水施設(取水口、海水管ダクト、取水ピット) ・取水ピット壁の高さ ・敷地高さと海水ポンプ揚程との関係 ・取水口の海底砂移動による閉塞
	3)水密扉 ・取付け方法や設置対象
	4)アクシデントマネジメント(AM)対策設備 ・半恒久施設 電源車、消防車、電源ケーブルなど ・AM策における構成設備の機能喪失 ・可搬設備 5)シビアアクシデントマネジメント(SAM)対策設備

事故進展に大きな影響を与える事項

(2) 時間的事故進展シナリオに係る事項	<ul style="list-style-type: none"> ・複数のSSCEsの同時損傷が機能喪失に与える影響 ・復旧に係る事項が与える影響
(3) ヒューマン及び情報通信	<ul style="list-style-type: none"> ・高ストレス下の誤操作、点検時の津波との遭遇、避難 ・津波監視・警報設備の利用

○ サイト敷地内での多数号機でのSSCEsの機能喪失

(1) 津波による共用施設の被害	<ul style="list-style-type: none"> ・海水給水系、外部電源系、屋外軽油タンク、電源融通など
(2) AM及びSAM対策設備	<ul style="list-style-type: none"> ・施設が多数号基対象の場合の機能喪失の可能性
(3) SSCEsの同時損傷	
(4) ヒューマン及び情報通信	

○ サイト敷地外における多数号機でのSSCEsの機能喪失

(1) 対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面浸食の影響 ・送電網 ・敷地外人工ダム ・情報通信網の途絶
(2) 防災	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺インフラ(港湾、道路、鉄道等)への影響 ・住民避難

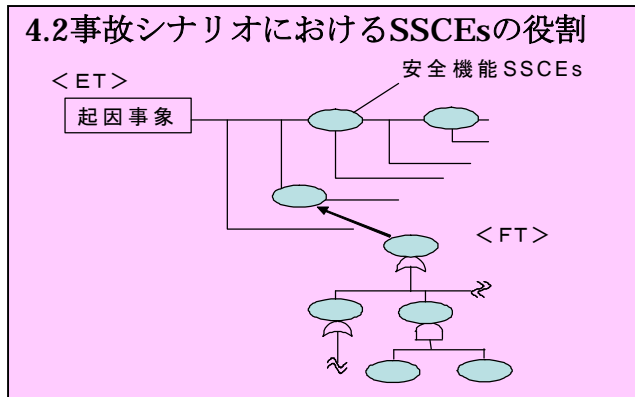
・ 地震・津波安全に関する性能

- 原子力安全の目的を津波来襲時においても成立させるために必要かつ重要な機能は、機器故障や人的過誤に代表されるランダム故障による場合のみならず、地震、火災、津波などの事象に対しても、これらの機能は達成されていなければならない。
- 加えて、設計想定を超える事態に対しても、その事態の程度に応じたレベルでの機能達成が求められる。

事故シナリオにおけるSSCEsの役割

- SSCEsがそれぞれの性能あるいは、それらの組み合わせで安全機能が達成される。例えば、直流電源の「電源供給性能」は、それが設置されている部屋の「水密性能」で津波の影響から防護され、「電源供給性能」が発揮される。
- 同じSSCEsでも違う事故シナリオで活躍することもある。そこで、まず実際の被害および津波PRA結果から事故シナリオを把握することとした。

事故シナリオから性能の導出プロセス



3章 事故シナリオ

津波PRA事故シーケンス

安全機能SSCEs

4.4 各SSCEsの確保すべき性能

分類	設置場所	津波防御SSCEs	耐津波性能
津波防護施設	屋外	防潮堤	来襲した津波の高さ、エネルギーを低減できること。
		敷地高さ	...
浸水防止設備	屋外

4.3 津波による影響モード

津波到達レベル	安全機能SSCEsに対する津波影響の防止・緩和策		
	屋外	屋内	CV内
レベル0	防波堤、敷地高さ、防潮堤、取水路構造により津波が敷地内に入らない。	—	—
レベル1

津波防御SSCEs

津波防御SSCEs

津波影響モードから必要な耐津波性能を考慮する

津波影響モード

津波防御SSCEs	浸水	波の力		
	被水・没水	波力	洗掘	...
敷地高さ	○	○	○	...
防波堤	○	○	○	...

分類	設置場所	安全機能SSCEs	耐津波性能
海水系	屋外	海水ポンプ	引き津波により、キャビテーションを起こさないこと。モーター部に被水しないこと。
循環水系	屋外

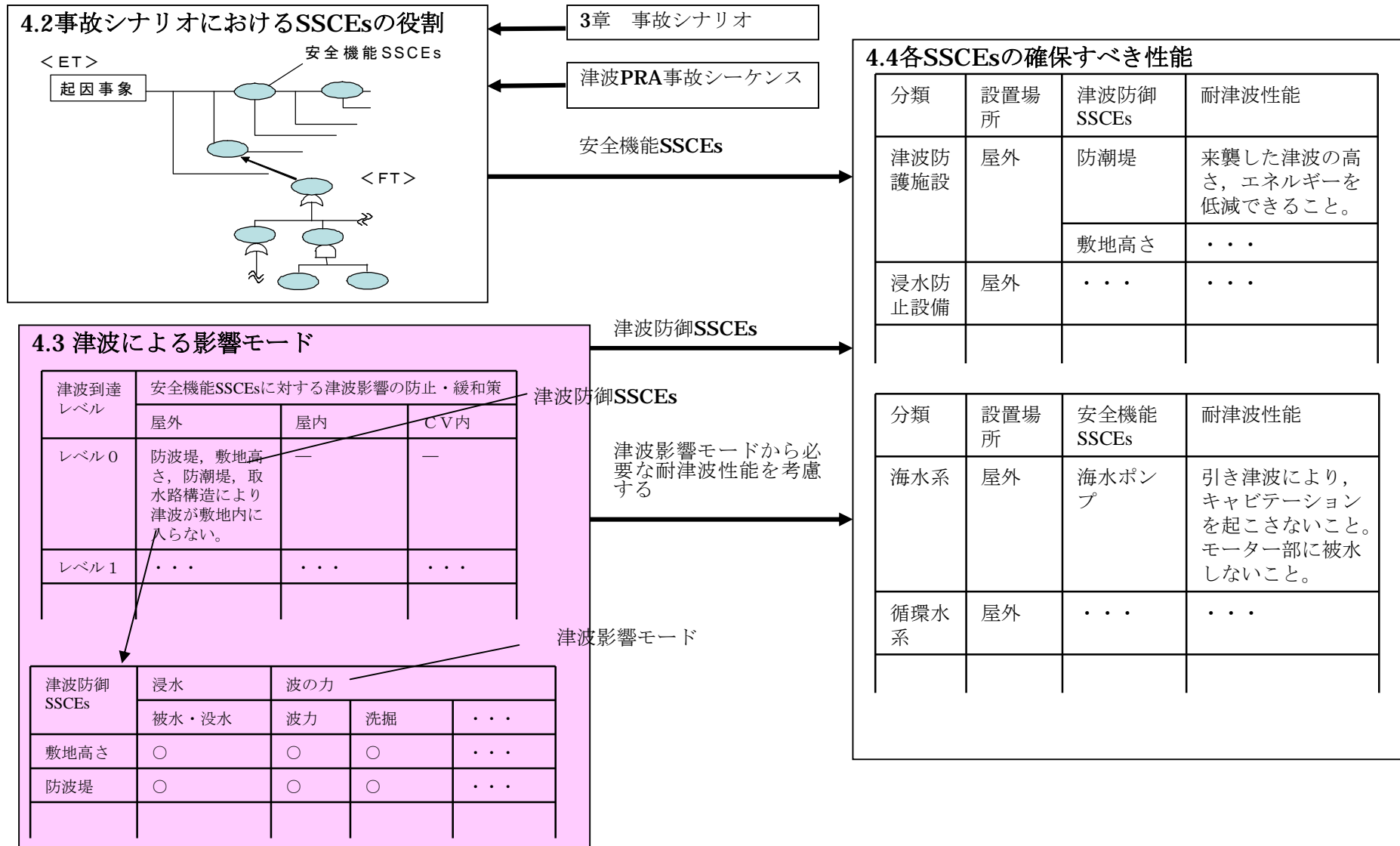
起因事象ごとのSSCEsの役割(#1)

起因事象	機器リスト							
主給水喪失	主給水ポンプ	復水ポンプ	復水ブースターポンプ	給水ブースターポンプ	常用系電源設備			
(主給水喪失) ※CCW喪失に 従属して発生	主給水流量制御弁	制御用空気系						
外部電源喪失	主変圧器	所内変圧器	予備変圧器	特高開閉所				
補機冷却水喪失	海水ポンプ	補機冷却水ポンプ	補機冷却水系統配管・弁	海水ポンプ現場操作箱	補機冷却水ポンプ電源操作箱			
過渡事象	循環水ポンプ	復水器真空ポンプ	常用系電源設備					
炉心損傷直結	中央制御室	主盤(原子炉盤)	原子炉補助盤	中央制御室外原子炉停止盤	原子炉安全保護計装盤	原子炉安全保護ロジック盤	安全保護シーケンス盤	ソレノイド分電盤

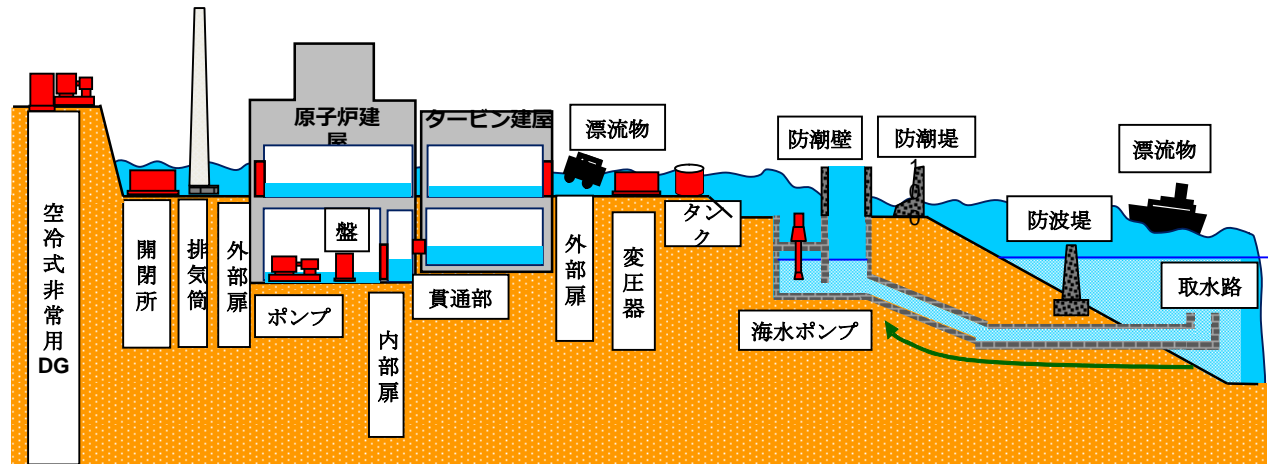
起因事象ごとのSSCEsの役割(#2)

起因事象	影響緩和機能	機器リスト						
主給水喪失	補助給水機能※1	タービン動補助給水ポンプ	電動補助給水ポンプ	復水タンク	補助給水逆止弁	タービン動補助給水ポンプ起動盤	2次系純水タンク	補助給水流量調整弁
外部電源喪失	非常用所内電源の確立	非常用ディーゼル発電機	ディーゼル発電機コントロールセンタ	ディーゼル発電機制御盤	内燃機関(ディーゼル機関)	海水系(海水ポンプ, 海水ポンプ現場操作箱)	燃料油移送ポンプ	燃料油貯蔵タンク
	補助給水機能	※1と同様						
補機冷却水喪失	補助給水機能	※1と同様						
	加圧器安全弁/逃がし弁LOCA							
	RCPシールLOCA							

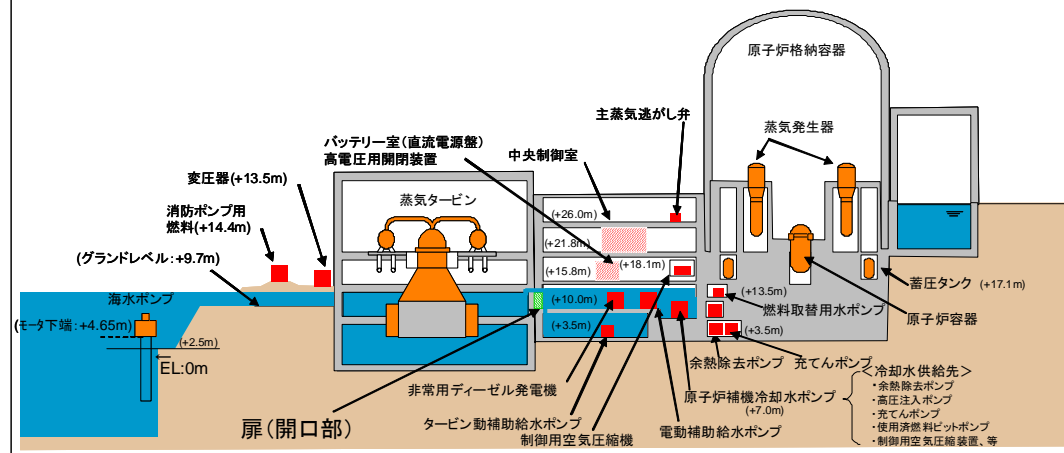
事故シナリオから性能の導出プロセス



原子力発電所への津波による影響（浸水）



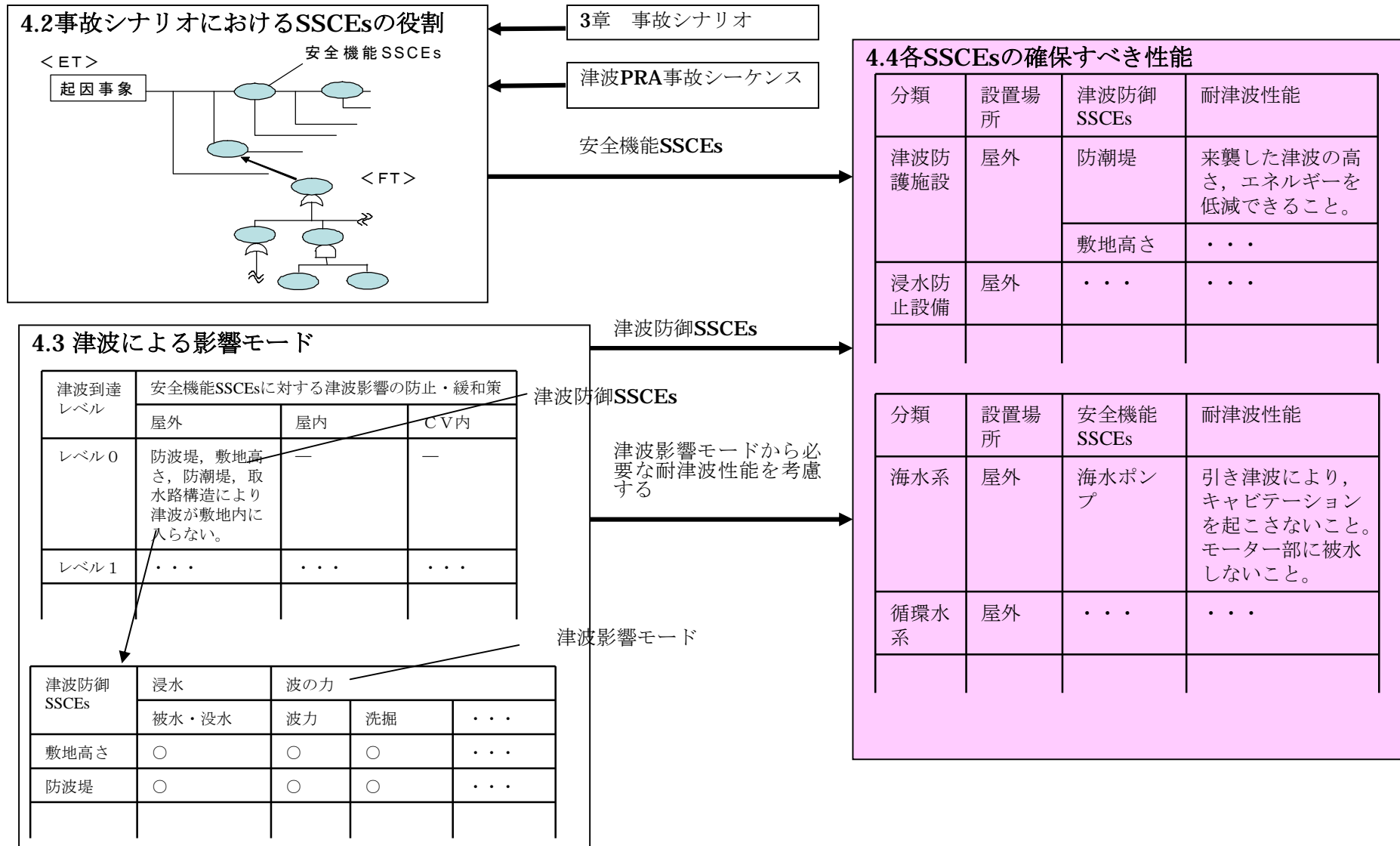
<プラント断面図（津波によるプラント内浸水を想定したイメージ例）>



津波による影響モード

津波防御SSCEs	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	○	—	—	—	—	—	—
機器周囲の 防潮囲い	○	○ (屋外)	○ (屋外)	○ (屋外)	—	—	○ (屋外)
排水設備	○	○ (屋外)	○ (屋外)	○ (屋外)	—	—	○ (屋外)

事故シナリオから性能の導出プロセス



設計方針(例)

津波防護策と耐津波施設・設備の設計方針(PWR例)

分類	設置場所	SSCE名称	耐津波施設・設備の設計方針
津波防護施設	屋外	防潮堤	来襲した津波の高さ，エネルギーを低減できること。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。
		敷地高さ	来襲した津波の高さ，エネルギーを低減できること。
		防波堤	越波が起こらないこと。倒壊しないこと。防潮堤の内側に浸水させないこと，又は侵入量を低減できること。
浸水防止設備	屋外	建屋設置面高さ 建屋開口部高さ (ダクト等) 建屋・水密扉	津波の最大高さにおける静水圧に耐えられること。来襲した津波の波力・流体力により倒壊しないこと。建屋内に水を浸入させない，又は侵入量を低減できること。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。
	屋内	機器室・水密扉 機器周囲の防潮囲い (堰等)	津波の最大高さにおける静水圧に耐えられること。建屋内に水を浸入させない，又は侵入量を低減できること。
津波監視設備	屋内	取水ピット水位計 津波監視カメラ	津波監視設備は，被水・没水あるい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。

耐津波性能(例)

安全機能を確保するためのSSCEsと耐津波性能(PWR例)

分類	設置場所	SSCE名称	耐津波性能
海水系	屋外	海水ポンプ 現場操作箱	引き波により、キャビテーションを起こさないこと。浮遊砂により、ローターの回転が妨げられないこと。モーター部に被水しないこと。
循環水系	屋外	循環水ポンプ	引き波により、キャビテーションを起こさないこと。浮遊砂により、ローターの回転が妨げられないこと。モーター部に被水しないこと。
主給水系	T/B	主給水ポンプ 給水プースターポンプ 主給水流量制御弁	引き波により、キャビテーションを起こさないこと。浮遊砂により、ローターの回転が妨げられないこと。モーター部に被水しないこと。
復水系	T/B	復水ポンプ 復水プースターポンプ 復水器真空ポンプ	モーター部に被水しないこと。津波による波力により損傷しないこと。
原子炉補機冷却水系	A/B I/B	原子炉補機冷却水ポンプ 補機冷却水系統配管・弁 電源操作箱	モーター一部に被水しないこと。津波による波力により損傷しないこと。
非常用電源	屋外	非常用DG メタクラ パワーセンタ	盤内の母線や用品の端子部は充電部が露出しているために、被水することにより絶縁低下等が起きないこと。
外部電源	屋外	主変圧器 所内変圧器 予備変圧器 特高開閉所	津波による波力により損傷しないこと。
直接炉心損傷	A/B	中央制御室 主盤(原子炉盤) 原子炉補助盤 中央制御室外原子炉停止盤 原子炉安全保護計装盤 原子炉安全保護盤ロジック盤 安全保護シーケンス盤 ソレノイド分電盤	盤内の母線や用品の端子部は充電部が露出しているために、被水することにより絶縁低下等が起きないこと。

まとめ

- 東北地方太平洋沖地震の震害事例と津波PRAから事故シナリオにおける設備の役割を分析
- 津波の影響のレベルにより、安全確保に必要な設備を分類。
- 津波防御設備を、津波防護施設、浸水防止設備そして津波監視施設に分けて、耐津波性能を整理した。
- 今後は、設計想定を越える規模の津波に対する設備の性能について、整理し、全ての事象レベルにおける安全確保に必要な全ての設備の性能を明らかにしていく。