

外的事象に対する原子力発電所の 安全対策とリスクマネジメント

(2) 事業者における取り組み

2021年9月8日

関西電力株式会社

国政 武史

鈴江 和昌

西川 武史



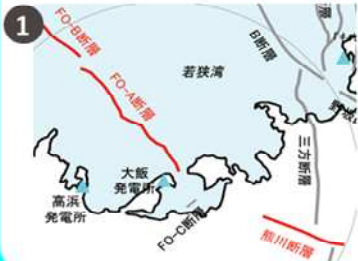
外的事象を踏まえた原子力発電所の設計について

2011年の東北地方太平洋沖地震により発生した過酷事故を踏まえて策定された新規制基準の規定に基づき、外的事象（地震、津波、外的火災、竜巻等）に対しても、様々な対策を行ってきた。

自然現象から発電所を守る備え(事故発生防止)

地震

○発電所周辺の断層の運動性等について、詳細な調査を実施。



保守的に運動性等を評価し、地震想定を引上げ。
(基準地震動Ss:700ガル)
必要箇所には耐震補強等実施。



重大事故を発生させないために

津波

○最大規模の津波を想定し、取水路防潮ゲート(T.P.+8.5m)、放水口側防潮堤(T.P.+8.0m)を設置。



<水位上昇側>(入力津波高さ)
・取水路閉塞部前面:T.P.+6.2m
・3、4号機海水ポンプ室前面:T.P.+2.8m
・放水路(奥):T.P.+6.7m
<水位下降側>(入力津波高さ)
・3、4号機海水ポンプ室前面:T.P.-2.5m



外部火災

○森林火災の延焼を防ぐため、発電所施設周辺の樹木を伐採し、幅18mの防火帯を確保



内部火災

○火災の影響軽減の各防護対策を追加実施。
・ケーブル等に耐火シートを巻き付す。
・異なる種類の火災検知器やハロン消火設備に加え、スプリンクラー等を追加設置。



竜巻

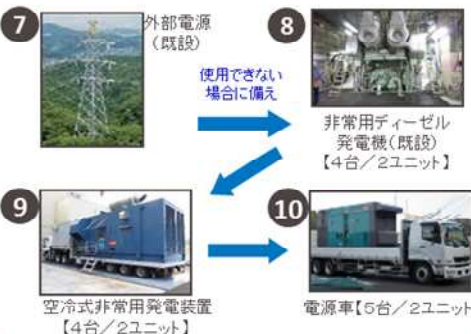
○飛来物から機器を守るために竜巻対策設備を設置
※過去の日本最大風速(92m/秒)を上回る、風速100m/秒の竜巻が発生した場合に、鋼製材が飛来すると想定



重大事故等対策(事故進展防止)

電源設備

○外部電源の強化や、所内電源を多重化・多様化



冷却機能の強化



※図はイメージです。

アクセスルート確保

○がれき撤去用重機を配備



万一、重大事故が発生した場合に備え

重大事故等対策(事故拡大防止)

放射性物質の放出抑制対策



格納容器の水素爆発防止対策

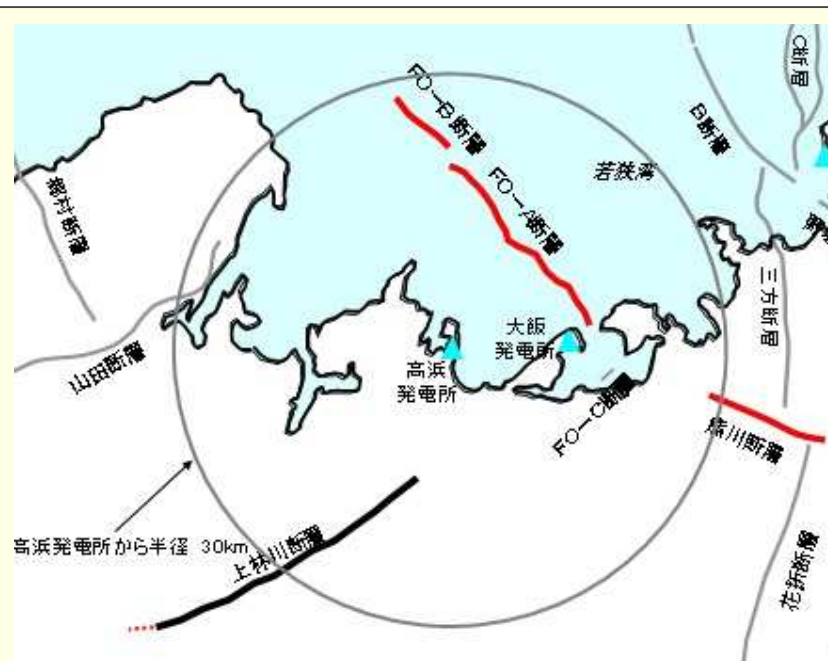


震源を特定して策定する地震動

○高浜発電所の基準地震動策定において、これまでは、FO-A～FO-B断層および上林川断層を検討用地震としていたが、FO-A～FO-B断層については熊川断層との3連動を考慮することとした。

■敷地及び敷地周辺の微動観測データ等を用いて、地震動評価に用いる地盤モデルを作成し、断層上端深さ3 kmを基本ケース（従来は4 km）として、FO-A～FO-B断層と熊川断層との3連動および上林川断層について地震動評価を実施。

- ・ S s - 1 を変更
550ガル→700ガル（高浜発電所）
- ・断層モデル波より4波を追加（S s - 2～5）



震源を特定せず策定する地震動

○震源を特定せず策定する地震動について、以下の基準地震動を採用。

- ・2000年鳥取県西部地震、賀祥ダムの観測記録
- ・2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

- ・これら2地震をS s - 6、S s - 7として追加

今後とも、敷地の地震観測の充実や微動観測の充実による地盤モデルの高精度化、地震動評価に関する知見収集を継続的に行う。

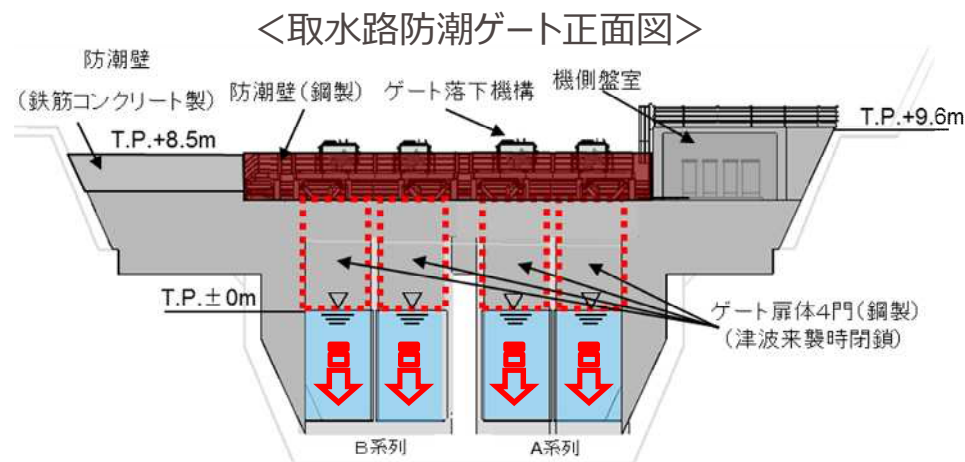
津波警報が発表されない可能性のある津波への対応

事象及び対策の概要

- ・当初、高浜発電所では、大津波警報が発表された後、取水路防潮ゲートを閉止する対策であった。
- ・警報が発表されない場合であっても、引き波により海水ポンプの取水可能水位を下回らないよう、津波が敷地に遡上しないよう、対策を講じた。
- ・基準津波として設定している津波に加えて、新たに津波警報が発表されない可能性がある津波として「隠岐トラフ海底地すべり」(単独)による津波を設定する。



- ・潮位計等の追加設置、取水路防潮ゲートの運用変更等を行った。
- ・想定津波高さのうち、引き波時の水位下降側の値を、厳しい側へ変更した。(例、1号機：-1.8m→-2.1mなど)
- ・運用変更等により、海水ポンプの取水性能への影響や敷地への遡上がないことを確認した。



- ・発電所構内の潮位計 (全4台) のうち2台以上で津波襲来と判断した場合、取水路防潮ゲート閉止等の操作を実施

事象及び対策の概要

- 安全上重要な施設を竜巻から防護するために、設計竜巻の最大風速を9.2 m/sとした。さらに安全側に100 m/sにて、竜巻荷重に対する健全性を確認。
- 竜巻による飛来物の発生を防止するため、飛来物源となる資機材の固縛対策を実施。（飛来物の飛散防止対策）
- 加えて、設計飛来物※の衝突を想定した場合においても、安全上重要な屋外設備の健全性を維持するための防護対策を実施。（飛来物の防護対策）
※原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに基づき鋼製材（質量135 kg）を設定

（海水ポンプエリアの飛来物防護対策の例）

設置前



設置後



事象及び対策の概要

- ・文献調査、地質調査、降下火砕物シミュレーション（Tephra2）及び越畑地点のD N P 評価層厚と距離の関係（大山火山から越畑地点及び各発電所までの距離）をもとにした検討結果から、発電所運用期間中における敷地の降下火砕物の層厚を設定した。
- ・この降下火砕物の層厚に対して、発電所の建屋や設備が降下火砕物の重量に耐えられること、建屋内の機器の吸気や排気に影響がないことを確認した。
 （例）屋外タンクの屋根板の溶接部補強、非常用DGフィルタの取替・清掃周期の見直し

[降下火砕物※1の最大層厚]

発電所	見直し前		見直し後	
	噴出規模	層厚	噴出規模	層厚
美浜発電所	5 km ³	10 cm	11.0 km ³	22 cm※2
高浜発電所				27 cm※2
大飯発電所				25 cm※2

※1：火山が噴火した際に噴出する火山灰や火砕流など
 ※2：当初申請した各発電所層厚は、美浜15cm、高浜25cm、大飯22cmであったが、原子力規制庁との議論を踏まえ、シミュレーション検証結果に加え、越畑地点の層厚が25cmであることをもとに、大山火山と各発電所の距離をもとにした層厚に見直した。



大山～越畑地点の距離、D N P 評価層厚をもとに、大山～各発電所の距離をもとにした層厚を算出する。

【算定式】
 各発電所の層厚 =
 (大山～越畑間距離 / 大山～発電所間距離)
 × 25cm (越畑地点の層厚)

- ・SA手順や大規模損壊時の手順を用いた訓練を継続的に実施することで、対応要員（社員及び協力会社社員）の操作に係る力量維持向上に努めている。
- ・また、重大事故等発生時にも確実に対応できるよう、悪天候や高線量下といった各種状況を想定した訓練を実施している。
- ・訓練実施後は反省事項の抽出を行い、手順等にフィードバックを行うことでSA対策の更なる実効性向上に努めている。

大容量ポンプ設置に係る訓練



可搬式代替低圧注水ポンプに係る訓練



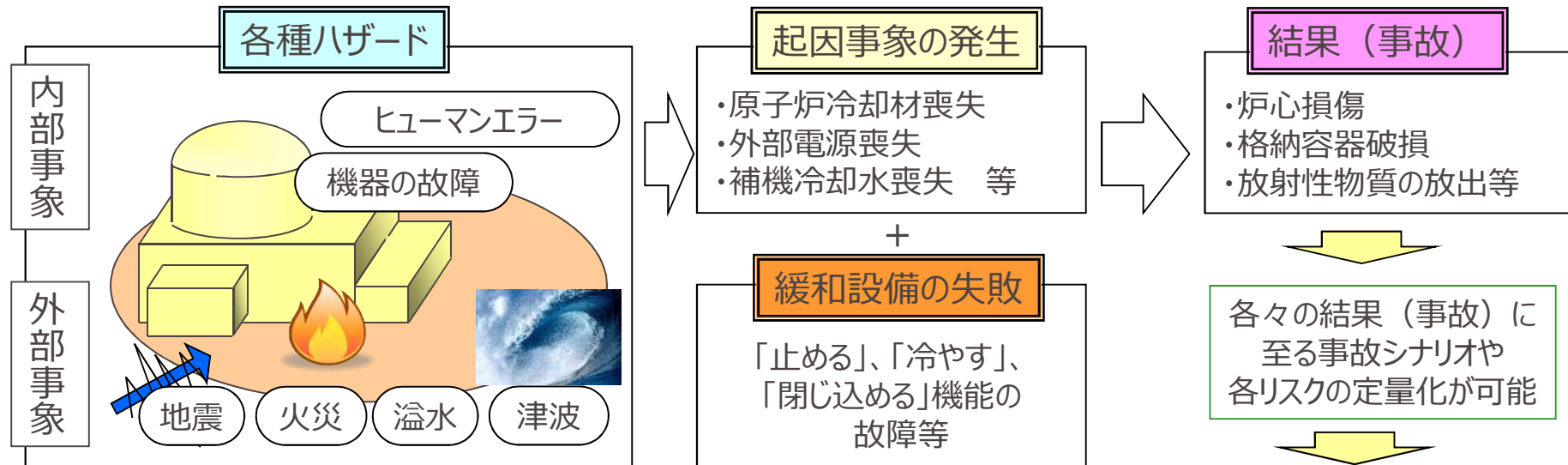
ホース展張に係る訓練



● 高浜発電所における教育・訓練実績

	H 2 3 年度	H 2 4 年度	H 2 5 年度	H 2 6 年度	H 2 7 年度	H 2 8 年度	H 2 9 年度	H 3 0 年度
教育・講習受講者 人数（延べ人数）	約 4 8 0 人	約 1,300 人	約 1,200 人	約 1,600 人	約 2,500 人	約 2,800 人	約 2,700 人	約 2,600 人
訓練回数	約 2 8 0 回	約 4 0 0 回	約 8 0 0 回	約 1,500 回	約 8 9 0 回	約 2,900 回	約 3,100 回	約 2,500 回

原子力発電所を取り巻く各種ハザードを要因として、発生する可能性のある事象（起因事象）から炉心損傷事故に至る頻度などについて、リスクとして定量的に評価する手法



- 発電所の安全レベルの定量的な確認が可能
- 炉心損傷事故等に至る頻度を指標として、事故シナリオの発生頻度や機器・系統の重要度の定量的な比較が可能

PRAの種類

【評価する範囲】

- レベル1: 炉心損傷頻度 (性能目標: 10^{-4} /年)
- レベル1.5: 格納容器破損頻度 (性能目標: 10^{-5} /年)
- レベル2: Cs-137の放出量100TBq超となる頻度 (安全目標: 10^{-6} /年)
- レベル3: 環境影響

【ハザードの分類】

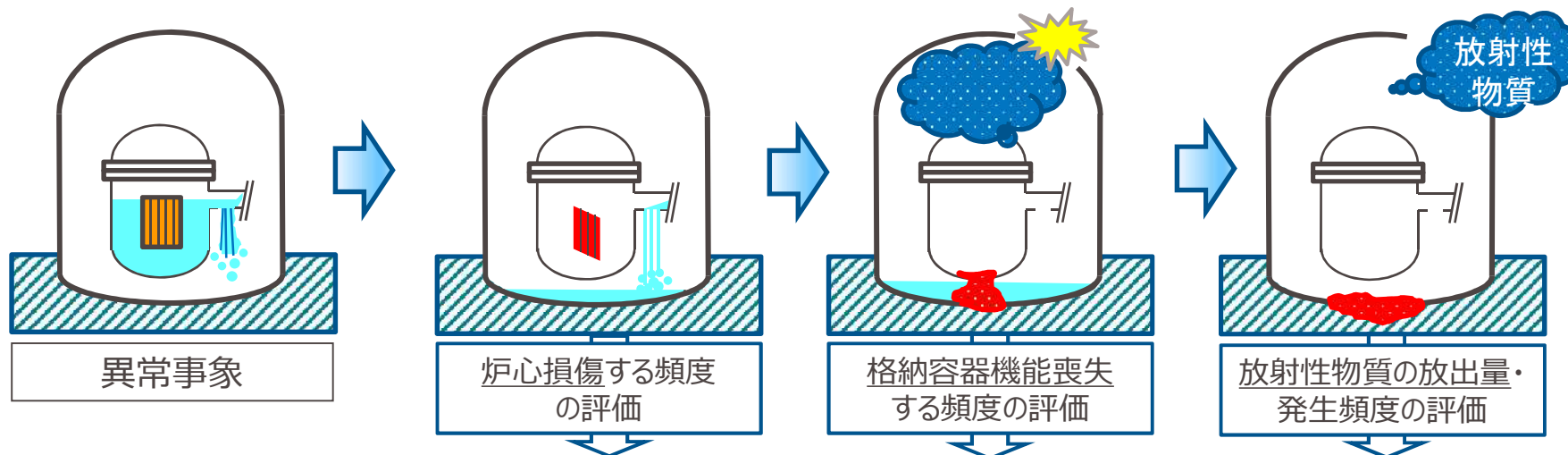
- 内部事象: (機器の偶発的故障、人的過誤など)
- 外的事象: 地震、津波、火災、溢水 など

【運転状態の分類】

- 出力運転時、 - 停止時

PRAの評価対象範囲・評価結果について

- ◆ 今回のPRA評価としては、異常事象(起因事象)の発生を発端とし、炉心損傷に至る評価(レベル1PRA)から、放射性物質の放出量・発生頻度の評価(レベル2PRA)等までの評価を実施している。
- ◆ また、その異常事象を発生させる要因として、内部事象、地震、津波を対象に実施している。



		PRAの分類	レベル1	レベル1.5	レベル2 Cs137放出量100TBqを超過する頻度
評価	内部事象	出力時	7.2E-7	1.7E-7	1.7E-7
		停止時	6.8E-7	—	—
	外部事象	地震	1.1E-7	6.6E-8	6.6E-8
		津波	1.6E-7	1.2E-7	1.2E-7
	合計			9.9E-7	3.6E-7

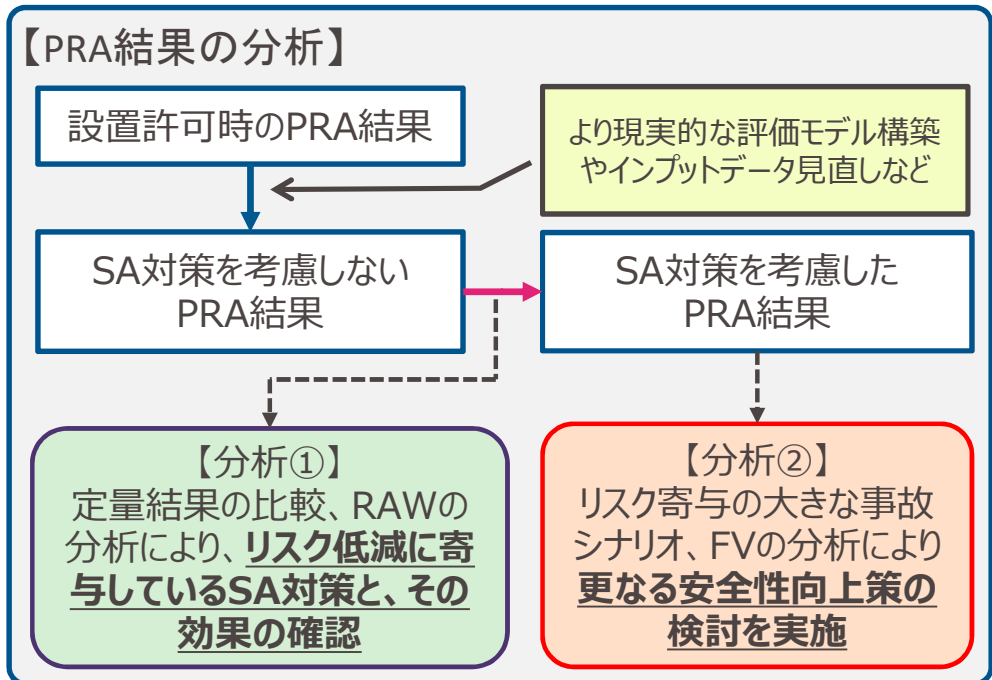
- ✓ 高浜発電所3号炉に対する安全性向上評価のうち、PRA(確率論的リスク評価)の分析結果をまとめたものである。
- ✓ この分析に当たっては、新規規制基準の適合のための設置変更許可申請の際にPRAを実施して以降、SA対策のモデル化や入力データの見直しを進めてきたモデルを用いて、以下に示す分析を実施している。

分析①：SA対策の効果の把握(Lv 1,1.5)

SA対策の考慮の有無によるPRA結果の比較および重要度指標(RAW※¹)の分析により、**リスク低減に大きく寄与しているSA対策と、その効果を確認した。**

分析②：更なる安全性向上策の検討(Lv 1～2)

SA対策を考慮したPRA結果(CDFおよびCFFの結果)から、リスク寄与の大きな事故シナリオおよび重要度指標(FV※²)の分析により、**更なる安全性向上対策案について、規制要求として実施を計画している対策も含め、検討を実施した。**



※ 1 RAW : ある機能が必ず喪失するとした場合のリスクの増分割合 (ある機能(対策)による、リスク改善効果を確認)

※ 2 FV : ある機能の喪失が、リスクに占める割合 (信頼性向上対策により、高い効果を期待できる機能を抽出)

(参考)安全目標との比較

内部事象、地震、津波のCDF、CFFの合計については、安全目標 (性能目標) の、CDF : 10⁻⁴/年程度、CFF : 10⁻⁵/年程度、100TBq (Cs137)を超える頻度 : 10⁻⁶/年程度、を下回る結果となった。しかしながら、今回の評価では対象としていないリスク (火災、溢水など) もあり、この結果に満足することなく、今後も継続的かつ自律的にリスクマネジメントを充実させることにより、更なる安全性向上に努めていく。

- ✓ これまでに、平成25年7月に施行された新規規制基準対応としての対策ならびに自主的な安全性向上対策として、種々のハード・ソフト面の対策を実施し、プラントのリスク低減のための取組みを行っている。
- ✓ 今回の安全性向上評価においては、分析①として、プラントの炉心損傷等のリスクの低減に寄与している対策（実施済みの対策）とその効果について、PRAを用いて把握する。
- ✓ 具体的には、SA対策を考慮したPRAとそれを考慮しないPRAの結果ならびに、リスク重要度指標としてRAW（※）の分析を行うことで、主にリスク低減に大きく寄与している対策とその効果を確認したものである。

分析① : SA対策の効果の把握 (レベル1PRA)

レベル1PRA	SA対策未考慮	SA対策考慮	リスク低減に大きな寄与をしている対策
① 内部事象PRA (出力時)	<p>1.4E-05</p>	<p>7.2E-07</p> <p>約1/19</p>	<ul style="list-style-type: none"> 2次系強制冷却※ フィードアンドブリード※ 空冷式非常用発電装置 <p>主なリスク要因である「2次冷却系からの除熱機能喪失」等に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
② 内部事象PRA (停止時)	<p>7.9E-04</p>	<p>6.8E-07</p> <p>約1/1000</p>	<ul style="list-style-type: none"> 恒設代替低圧注水ポンプ° 2次系強制冷却※ 代替再循環※ <p>主要なリスク要因である「原子炉冷却材の流出」に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
③ 地震PRA	<p>3.7E-07</p>	<p>1.1E-07</p> <p>約1/3</p>	<ul style="list-style-type: none"> 2次系強制冷却※ 空冷式非常用発電装置 <p>主要なリスク要因である、地震による「全交流電源喪失」や「原子炉補機冷却機能喪失」等に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
④ 津波PRA	<p>4.0E-05</p>	<p>1.6E-07</p> <p>約1/250</p>	<ul style="list-style-type: none"> 防潮ゲート 開口部止水対策(シール) 2次系強制冷却※ <p>主要なリスク要因である、津波による「全交流電源喪失」に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
出力時合計 (①+③+④)	5.4E-05	9.9E-07	約1/55

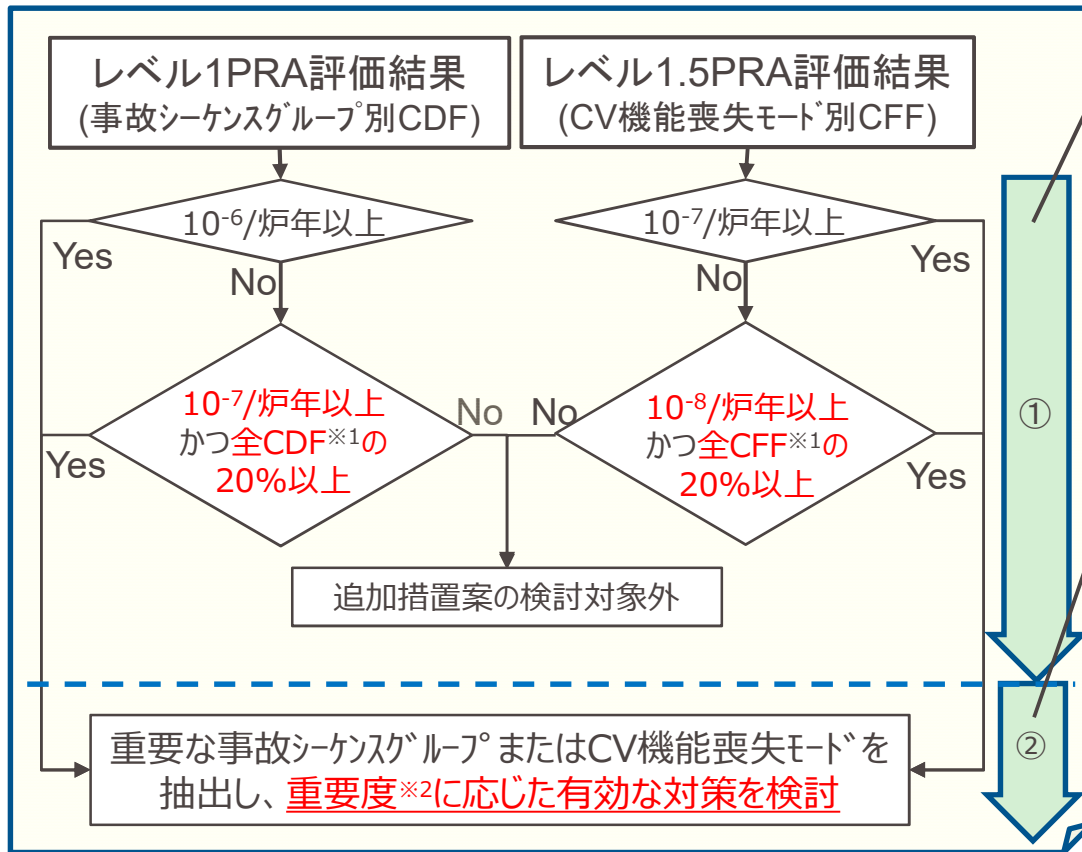
※東日本大震災以前より自主的に整備されていた対策

分析①：SA対策の効果の把握 (レベル1.5PRA)

レベル 1.5PRA	SA対策未考慮	SA対策考慮	リスク低減に大きな寄与をしている対策
⑤ 内部 事象 PRA (出力時)	<p>1.4E-05</p>	<p>1.7E-07</p> <p>約1/82</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器内自然対流冷却(CCW通水)※ ・格納容器内自然対流冷却(海水通水) ・恒設代替低圧注水ポンプ <p>CDFの低減、また主なリスク要因である「過圧破損」に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
⑥ 地震 PRA	<p>3.7E-07</p>	<p>6.6E-08</p> <p>約1/5</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・代替制御用空気供給 (窒素ポンベによるアニユラス空気浄化系の排気弁開放) ・恒設代替低圧注水ポンプ <p>CDFの低減、また主なリスク要因である「過圧破損」に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
⑦ 津波 PRA	<p>4.0E-05</p>	<p>1.2E-07</p> <p>約1/330</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器内自然対流冷却(海水通水) ・格納容器内自然対流冷却(CCW通水)※ <p>CDFの低減、また主なリスク要因である「過圧破損」に対して、主に上記の対策がその低減に寄与している。</p>
出力時合計 (⑤+⑥+⑦)	5.4E-05	3.6E-07	約1/150

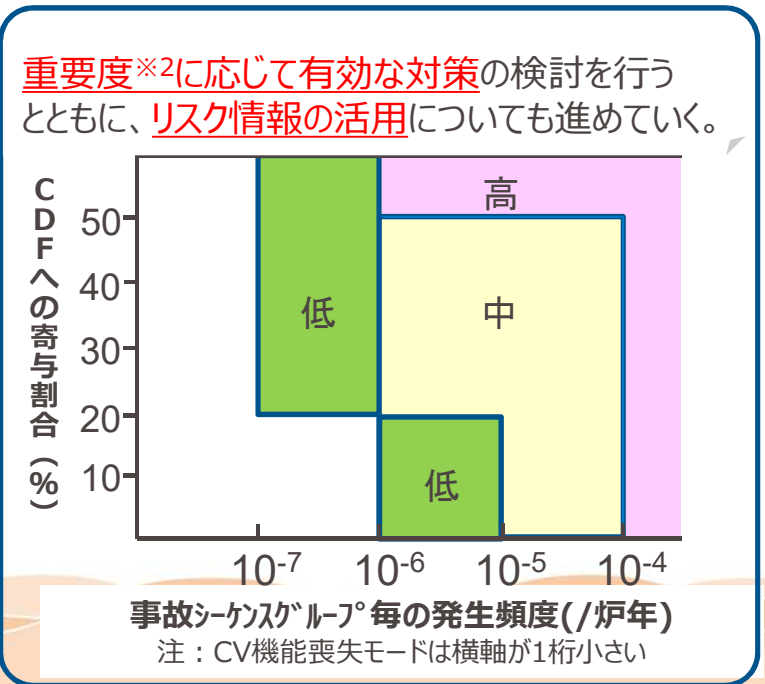
分析②：更なる安全性向上策の検討（レベル1、1.5PRA）

現状のプラントの安全性を更に向上するための効果的な対策の検討を目的とし、リスク寄与が大きなものから優先的に検討するため、SA対策後のPRA結果（事故シーケンスグループ別のCDF等）から、以下のフローにより検討対象を選定し、追加措置案の検討を行った。



ステップ①
リスク評価上 重要な事故シーケンスグループと 格納容器(以下、CV)機能喪失モードを抽出

ステップ②
リスク寄与の大きな事故シナリオやFV重要度分析結果を用いて、更なる安全性向上対策案を検討(規制要求により実施計画中の対策を含む)



※1： 内的出力時、内的停止時、地震、津波のうち、評価対象とした各PRAの中でのリスク合計値
 ※2： 『原子力発電所におけるシビアアクシデントマネジメントの整備及び維持向上に関する実施基準：2013』において、重要度「高」「中」「低」の事業者の対応が記載されており、これを参考に対応を実施する。なお、CV機能喪失モードについては、横軸が一桁ずつ低い値を閾値として設定

重要な事故シナリオグループの抽出と重要度分類(高浜3号機の例)

PRAの結果から、事故シナリオグループ毎、CV機能喪失モード毎のリスク評価値を整理し、それぞれのCDF/CFF値および全事故シナリオグループ / CV機能喪失モードに対する寄与割合から、下表のとおり、重要な事故シナリオグループ等を抽出した。(ピンク色ハッチング部：重要度「高」、緑色ハッチング部：重要度「低」)

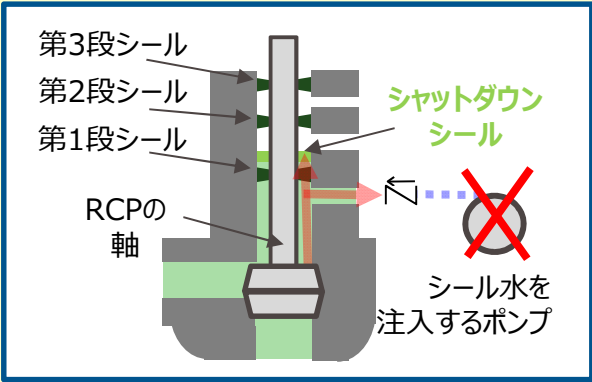
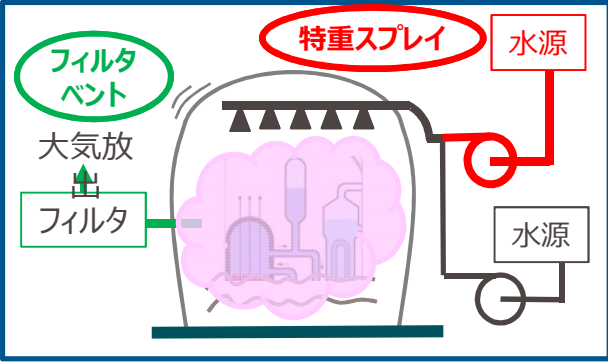
【レベル1 P R A】

【レベル1.5 P R A】

事故シナリオグループ	内部事象 (出力時)	内部事象 (停止時)	地震	津波	CV機能喪失モード	内部事象 (出力時)	地震	津波
2次冷却系からの除熱機能喪失	9.6E-8	4.4E-9	3.0E-9	ε	原子炉容器内水蒸気爆発	2.7E-11	ε	2.1E-12
全交流電源喪失	1.4E-7	1.1E-7	6.6E-8	1.6E-8	格納容器隔離失敗	1.4E-8	2.2E-8 (33.3%)	2.5E-8 (20.8%)
原子炉補機冷却機能喪失	7.2E-8	3.2E-9	3.2E-8	1.2E-7 (75.0%)	水素燃焼	ε	ε	ε
原子炉格納容器の除熱機能喪失	5.3E-9		ε		水蒸気・非凝縮性ガス蓄積による過圧破損	1.3E-7 (76.5%)	3.8E-8 (57.6%)	8.7E-8 (72.5%)
原子炉停止機能喪失	1.1E-9		1.3E-9		ベースマット溶融貫通	2.7E-9	1.5E-9	1.6E-9
ECCS注水機能喪失	3.3E-7 (45.8%)		1.1E-9		水蒸気蓄積によるCV先行破損	4.2E-9	3.1E-10	3.0E-9
ECCS再循環機能喪失	5.4E-8		3.0E-12		原子炉容器外水蒸気爆発	3.4E-10	3.7E-12	4.7E-11
格納容器バイパス	2.2E-8				格納容器雰囲気直接加熱	0	0	0
崩壊熱除去機能喪失(停止時)		1.5E-7 (22.1%)			インターフェイスシステム LOCA	4.0E-9		
原子炉冷却材の流出(停止時)		4.1E-7 (60.3%)			蒸気発生器伝熱管破損	1.8E-8	2.0E-9	3.0E-11
反応度の誤投入(停止時)		9.1E-9			過温破損	6.5E-11	3.2E-11	1.5E-10
炉心損傷直結事象			5.0E-9	1.7E-8	溶融物直接接触	ε	ε	ε
合計	7.2E-7	6.8E-7	1.1E-7	1.6E-7	地震によるCV先行機能喪失		3.0E-9	
					合計	1.7E-7	6.6E-8	1.2E-7

注：εは無視小(0.1%未満)。また、重要な事故シナリオグループ等として抽出されるものを対象に、その割合を記載。

高浜3号機のPRA結果に対し、リスクに対して寄与の大きな事故シナリオグループ等に着目し、以下のとおり、ハード面、ソフト面の両面で安全性向上対策を抽出した。

ハード面	(1)RCPシャットダウンシール (自主的対策)	(2) 格納容器(特重)スプレイ+フィルタベント (規制要求対応)
	<p>SBO時等のRCPシールLOCA発生リスクの低減によるCDF、CFFの低減が期待。地震・津波も同様の効果がある見込み。</p> 	<p>CVの過圧破損リスク低減によるCFF低減が期待(過圧破損モードの割合は全CFFのうち約50~70%であり寄与が大きい)。</p> 
ソフト面	<p>運転操作・事故時の活動において、さらなるプラントの信頼性・安全性向上のため、以下を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> 健全性確認手順の追加による設備の信頼性向上 運転員を対象とした運転操作訓練や、緊対要員訓練の教育・訓練プログラム策定等への活用 (代表的事故シナリオに登場する操作失敗等を、教育や訓練を通じて、把握すること自体が、リスク活用の一環であり、こういった活動を踏まえ、よりよいリスク活用について、検討していく。) 	