

島根原子力発電所2号機

確率論的リスク評価による事故シーケンス選定 (審査会合における指摘事項の回答)

平成27年11月19日
中国電力株式会社

1. これまでの審査状況

新規基準では、福島第一原子力発電所事故を踏まえて実施してきた重大事故等対策の有効性を評価するため、

- ① 重大事故等対策が実施されていない状態を仮定し、内部事象（機器故障・人的ミス等）や外部事象（地震・津波）が原因となって重大事故に至る確率を評価（確率論的リスク評価：PRA）
 - ② ①の評価結果を踏まえ、重大事故が進展するシナリオ（事故シーケンス）を選定
 - ③ 実施されている重大事故等対策が有効に機能するかを評価（有効性評価）
- することが求められている。

これまでの審査の状況等

当社からの説明内容（H26.10.2 審査会合）	主なコメント（論点）
<ul style="list-style-type: none">・ 確率論的リスク評価（内部事象，外部事象）の結果を踏まえ、対策の有効性を確認するための事故進展シナリオ（事故シーケンス）の選定について説明。	<ul style="list-style-type: none">・ シナリオ選定の考え方や選定理由等について詳細に説明すること

2. 主な指摘事項への回答(その1)

(指摘事項)

- ✓ PRAの分析に基づいて選定された対策の説明をした上で、事故シーケンスにおける対策を説明すること。
- ✓ 各事故シーケンスに対して選定された対策に代表性があることを説明すること。(CV破損, 停止時も同様)

(回答)

各事故シーケンスグループごとに対策を整理し、代表性のあることを示した。

<例> 内部事象レベル1PRA 全交流動力電源喪失

選定した対策は、全交流動力電源喪失に属するすべての事故シーケンスに(以下の

①~④) 対し有効である。

カットセットレベルの機器の機能喪失を考慮した結果、対策が有効とならない事故シーケンスの割合は1%未満。よって、本対策は代表性があると考えられる。

- ①長期TB: 外部電源喪失 + 交流電源(DG-A, B) 失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS) 失敗
- ②TBP: 長期TB + 圧力バウンダリ健全性(SRV再閉) 失敗
- ③TBU: 長期TB + RCIC故障
- ④TBD: 外部電源喪失 + 直流電源(区分1, 2) 失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS) 失敗

2. 主な指摘事項への回答(その1)

1) ①長期TB, ②TBP, ③TBU

外部電源喪失時に非常用交流電源が喪失し、原子炉への注水にも失敗する事故シーケンス。炉心損傷防止対策としては、低圧原子炉代替注水系(常設)を選定。

低圧原子炉代替注水系(常設)は、系統構成に必要な弁駆動の電源を含め、設計基準事故対処設備(非常用ディーゼル発電機)とは独立したガスタービン発電機車から必要な電力を供給できるため、非常用交流電源が喪失している本事故シーケンスにおいても原子炉への注水が可能。

炉心冷却後に、最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設計基準事故対処設備(残留熱除去系及び原子炉補機冷却系)に対して独立した格納容器フィルタベント系による格納容器からの除熱を行うことで、本事故シーケンスに対応可能。

2) ①長期TB

1) のガスタービン発電機車が使用できない場合において、原子炉隔離時冷却系が一定時間運転継続して機能喪失した後は、低圧原子炉代替注水系(可搬型)による原子炉への注水が可能。

3) ④TBD

外部電源喪失時に直流電源の確保に失敗し、非常用ディーゼル発電機の起動に失敗した場合は、所内常設蓄電式直流電源設備から電力を供給することにより非常用ディーゼル発電機を起動し、非常用炉心冷却系等により原子炉へ注水し、炉心を冷却することが可能。

2. 主な指摘事項への回答(その1)

事故シーケンスの分析結果(全交流動力電源喪失)

事故シーケンス		CDF (/炉年)	対応する主要な 炉心損傷防止対策
全交流動力電源喪失	①外部電源喪失＋交流電源(DG-A, B)失敗＋高圧炉心冷却(HPCS)失敗	2.7E-09	<ul style="list-style-type: none"> ・低圧原子炉代替注水系(常設) ・逃がし安全弁の手動操作 ・格納容器フィルタベント系 ・ガスタービン発電機車 【ガスタービン発電機車機能喪失の対策】 <ul style="list-style-type: none"> ・低圧原子炉代替注水系(可搬型) 【直流電源喪失の対策】 <ul style="list-style-type: none"> ・所内常設蓄電式直流電源設備
	②外部電源喪失＋交流電源(DG-A, B)失敗＋圧力バウンダリ健全性(SRV再閉)失敗＋高圧炉心冷却(HPCS)失敗	8.2E-12	
	③外部電源喪失＋交流電源(DG-A, B)失敗＋高圧炉心冷却失敗	1.2E-11	
	④外部電源喪失＋直流電源(区分1, 2)失敗＋高圧炉心冷却(HPCS)失敗	3.8E-12	

2. 主な指摘事項への回答(その2)

(指摘事項)

- ✓ 有効性評価において、重要事故シーケンスに他のシーケンスが包絡されていることを説明すること。
- ✓ 重要事故シーケンスの抽出について、着眼点毎の分類の考え方、着眼点を踏まえた選定の考え方を詳細に説明すること。
- ✓ 重要性が高く評価されているシーケンスは、漏れなく有効性評価を示すこと。

(回答)

重要事故シーケンスの選定は、審査ガイドに記載の4つの着眼点に沿って実施。

【審査ガイドに記載の着眼点】

- a. 共通原因故障又は系統間の機能の依存性によって複数の設備が機能喪失し、炉心の著しい損傷に至る。
- b. 炉心損傷防止対策の実施に対する余裕時間が短い。
- c. 炉心損傷防止に必要な設備容量(流量又は逃がし弁容量等)が大きい。
- d. 事故シーケンスグループ内のシーケンスの特徴を代表している。

- ①4つの着眼点について影響度「高」「中」「低」で整理。
- ②以下の観点で事故シーケンスとの包絡関係を考慮し、重要事故シーケンスを選定。
 - ・事故シーケンスにおいて喪失する安全機能やそれに対して必要となる設備及び対策が類似する
 - ・事象進展に大きな差異が表れず重要事故シーケンスや他のシーケンスグループに包絡される

2. 主な指摘事項への回答(その2)

事故シーケンスグループ「全交流動力電源喪失」における選定の例。

「全交流動力電源喪失」は、いずれのシーケンスも「高」が3つある。これらのうち、他のシーケンスとの包絡関係等を考慮し、①「長期TB(外部電源喪失+DG-A, B失敗+HPCS失敗)」を重要事故シーケンスとして選定。

②「TBP(外部電源喪失+DG-A, B失敗+SRV再閉失敗+HPCS失敗)」

②の事故シーケンスは、減圧に伴う原子炉隔離時冷却系の機能喪失により原子炉注水にも失敗するシーケンス。事象進展が緩慢であるが、高圧注水に失敗した後、注水手段の確保を必要とするという点で事故シーケンスグループ「高圧・低圧注水機能喪失 (TQUV)」に類似している。よって、本事故シーケンスはTQUVに包絡される。

③「TBU(外部電源喪失+DG-A, B失敗+高圧炉心冷却失敗)」

③の事故シーケンスは、原子炉隔離時冷却系故障による原子炉注水にも失敗するシーケンス。高圧注水に失敗した後、低圧注水手段がなく、注水手段の確保を必要とする点でTQUVと類似している。よって、本事故シーケンスはTQUVに包絡される。

④「TBD(外部電源喪失+直流電源失敗+HPCS失敗)」

④の事故シーケンスは、外部電源喪失時に直流電源の喪失とHPCSの機能喪失が重畳するシーケンス。本事故シーケンスに対しては、注水手段の確保を行うという点で、TQUVと対策が共通。注水手段の確保としては、TQUVにて、ガスタービン発電機車及び低圧原子炉代替注水系(常設)による炉心損傷防止の有効性を確認。また、所内常設蓄電式直流電源設備から電力を供給することにより、非常用ディーゼル発電機を起動し、非常用炉心冷却系で注水を行うことも可能。所内常設蓄電式直流電源設備への切替は遮断器の操作のみであるため容易に行うことができる。よって、本事故シーケンスは重要事故シーケンスとして選定しない。

2. 主な指摘事項への回答(その2)

重要事故シーケンスの選定について(抜粋)

事故シーケンスグループ	事故シーケンス	対応する主要な炉心損傷防止対策 (下線は有効性を確認する主な対策)	重要事故シーケンス選定の考え方				選定した重要事故シーケンスと選定理由
			a	b	c	d	
高圧・低圧注水機能喪失	① 過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗	・低圧原子炉代替注水系(常設) ・逃がし安全弁の手动操作 ・格納容器フィルタベント系 ・ガスタービン発電機車	中	高	高	高	a. 主要な事故シーケンスのカットセットに共通要因故障が含まれている事故シーケンスを「中」とした。サポート系喪失は、起回事象の時点で系統間の機能の依存性によって、同区分の複数の設備が機能喪失することを考慮し、「高」とした。 b. 過渡事象は、原子炉水位低(L3)が事象進展の起点になるケースがあり、通常水位から原子炉を通常停止させる手动停止及びサポート系喪失に比べて事象進展が早い。このため余裕時間を「高」とした。手动停止及びサポート系喪失は通常の停止操作のため過渡事象と比較して余裕時間があるため「低」とする。 c. SRV再開失敗を含むシーケンスは、SRVから一定程度減圧されるため、再開成功のシーケンスよりも速やかに低圧状態に移行でき、低圧系での代替注水に期待できることから、SRV再開成功のシーケンスを「低」とし、SRV再開失敗を含まないシーケンスを「高」とした。 d. 全CDF(7.7E-06/炉年)に対しての寄与は0.5%と小さい。当該事故シーケンスグループの中でドミナントシーケンス(3.8E-08/炉年)を「高」とした。ドミナントシーケンスより2桁小さいシーケンス(3.8E-10/炉年以下)は、「低」とし、「高」と「低」の間のシーケンスを「中」とした。
	② 過渡事象 + 圧力バウンダリ健全性(SRV再開)失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS)失敗 + 低圧炉心冷却失敗		中	高	低	中	
	③ 手动停止 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗		中	低	高	中	
	④ 手动停止 + 圧力バウンダリ健全性(SRV再開)失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS)失敗 + 低圧炉心冷却失敗		中	低	低	中	
	⑤ サポート系喪失 + 高圧炉心冷却失敗 + 低圧炉心冷却失敗		高	低	高	低	
	⑥ サポート系喪失 + 圧力バウンダリ健全性(SRV再開)失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS)失敗 + 低圧炉心冷却失敗		高	低	低	低	
高圧注水・減圧機能喪失	① 過渡事象 + 高圧炉心冷却失敗 + 原子炉減圧失敗	・代替自動減圧機能 ・低圧注水系 ・残留熱除去系(サブプレッションプール冷却)	中	高	中	高	a. 主要な事故シーケンスのカットセットに共通要因故障が含まれている事故シーケンスを「中」とした。サポート系喪失は、起回事象の時点で系統間の機能の依存性によって、同区分の複数の設備が機能喪失することを考慮し、「高」とした。 b. 過渡事象は原子炉水位低(L3)が事象進展の起点になるケースがあり、通常水位から原子炉を通常停止させる手动停止及びサポート系喪失に比べて事象進展が早い。このため余裕時間を「高」とした。一方、手动停止及びサポート系喪失は通常の停止操作のため過渡事象と比較して、余裕時間が長い「低」とする。 c. いずれのシーケンスにおいても、新たな減圧手段を必要とするため「中」とする。 d. 全CDF(7.7E-06/炉年)に対しての寄与は0.1%と小さい。当該事故シーケンスグループの中でドミナントシーケンス(8.6E-09/炉年)を「高」とした。ドミナントシーケンスより2桁小さいシーケンス(8.6E-11/炉年以下)は、「低」とし、「高」と「低」の間のシーケンスを「中」とした。
	② 手动停止 + 高圧炉心冷却失敗 + 原子炉減圧失敗		中	低	中	低	
	③ サポート系喪失 + 高圧炉心冷却失敗 + 原子炉減圧失敗		高	低	中	中	
全交流動力電源喪失	① 外部電源喪失 + 交流電源(DG-A, B)失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS)失敗	・低圧原子炉代替注水系(常設) ・格納容器フィルタベント系 ・ガスタービン発電機車 【ガスタービン発電機車喪失の対策】 ・低圧原子炉代替注水系(可搬型) 【直流電源喪失の対策】 ・所内常設蓄電式直流電源設備	高	中	高	高	a. 系統間機能依存性の観点からは、全シーケンスを通じて同程度である。 b. 余裕時間の観点からは、RCICが注水に失敗する②③④を抽出した。 c. 設備余裕の観点からは、全シーケンスを通じて同程度である。 d. 代表シーケンスの観点からは、最も頻度が支配的である①を抽出した。 重要性が高く評価されるシーケンスは、「高」3つを有する①②③④である。 これらのうち②③④は以下の理由から、本事故シーケンスグループにおける重要事故シーケンスに選定しない。 ※②③④のシーケンスの扱いについて ・②③のシーケンスは、高圧注水に失敗した後、高圧または低圧注水の手段を確保を必要とするという点でTQUVと類似している。②③はTQUVに包絡され、その対策であるガスタービン発電機車及び低圧代替注水系(常設)により事象収束が可能である。 ・また、④のシーケンスは、注水手段の確保を行うという点で、TQUVと対策が共通している。注水手段の確保としては、TQUVにて、ガスタービン発電機車及び低圧原子炉代替注水系(常設)による炉心損傷防止の有効性を確認している。また、所内常設蓄電式直流電源設備から電力を供給することにより、非常用ディーゼルを起動し、非常用炉心冷却系で注水を行うことも可能である。(図1)所内常用蓄電式直流電源設備への切替は遮断器の操作のみであるため容易に行うことができる。 ●以上より、①を重要事故シーケンスとして選定した。
	② 外部電源喪失 + 交流電源(DG-A, B)失敗 + 圧力バウンダリ健全性(SRV再開)失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS)失敗		高	高	高	低	
	③ 外部電源喪失 + 交流電源(DG-A, B)失敗 + 高圧炉心冷却失敗		高	高	高	高	
	④ 外部電源喪失 + 直流電源(区分1, 2)失敗 + 高圧炉心冷却(HPCS)失敗		高	高	高	低	

2. 主な指摘事項への回答(その3)

(指摘事項)

- ✓ 外部事象については、損傷モードは内的PRAに内包されても対策に影響を及ぼす場合は事故シーケンスが異なることが想定されるので、対策を含めて内的PRAに包絡されることを説明すること。
- ✓ 外部事象(地震・津波以外)の考慮について、頻度や影響などの観点から、シーケンスの追加の要否について説明すること。

(回答)

外部事象のうち、地震、津波についてはPRAによって、その他の自然現象についても設計基準を超える規模の外部事象が発生した場合の影響を評価。

(1) 地震

重大事故等対処設備は、基準地震動による地震力に対して機能を維持するように設計。大規模な地震の場合は、建物・構築物の損傷等の炉心損傷直結事象が発生することが考えられるが、これらについては地震特有のシーケンスとして抽出。

炉心損傷直結事象に至らず、設計基準事故対処設備が機能喪失に至る場合、重大事故等対処設備は設計基準事故対処設備との位置的分散による地盤・建物の応答の違いから機能維持される可能性はあるがその不確かさは大きく、損傷程度や組合せを特定することは困難。

したがって、常設の重大事故等対処設備の機能喪失が発生した場合に備え、可搬型のポンプや電源等、多様化した対策をアクセス性の確保も考慮した上で配備しておくことが重要と考える。これらの有効性は、今後行う重大事故等対処設備を含めた地震PRA等によって評価していく。

(2) 津波

重大事故等対処設備については、基準津波に対して機能を維持するように設計。護岸周辺に設置された高さEL15.0mの防波壁を大きく越えるような津波が襲来した場合に発生する直接炉心損傷に至る事象については、津波特有のシーケンスとして抽出。

直接炉心損傷に至る事象が発生しない津波高さの場合、重大事故等対処設備は設計基準事故対処設備に対して分散配置、また、可搬型設備についても分散配置しており、被害が生じにくい。

(3) その他自然現象

その他自然現象に伴う起因事象は、内的あるいは地震、津波PRAで考慮している起因事象に包含され、新たに追加すべき事故シーケンスはないことを確認。

2. 主な指摘事項への回答(その3)

起回事象の発生が考えられるその他の自然現象と起回事象発生時の対応(抜粋)

事象	考慮対象とした起回事象	起回事象の発生シナリオ	想定される他の緩和系設備への影響	緩和系設備の機能喪失への対応
竜巻	外部電源喪失	送受電設備の損傷による外部電源喪失	建物内の機器には影響しない。建物外の機器に竜巻による影響が生じる可能性がある。	建物内の機器には影響しないことから、必要な緩和機能を維持できるものと考えられる。 非常用ディーゼル発電機の機能維持には影響しないと考えられることから、外部電源喪失時においても電源供給は可能と考えられる。
	復水器真空度喪失	循環水ポンプの損傷による復水器真空度喪失		
凍結	外部電源喪失	送受電設備の地絡・短絡に伴う外部電源喪失	建物内の機器には影響しない。建物外の機器に極低温による影響が生じる可能性がある。	建物内の機器には影響しないことから、必要な緩和機能を維持できるものと考えられる。 建物外の機器に対しても、低温事象は事前に予測可能であること、また気温の低下は緩慢であることから凍結防止保温等の対策を講じることにより機能を維持できるものと考えられる。
積雪	外部電源喪失	送受電設備の地絡・短絡に伴う外部電源喪失	積雪の静的荷重による各建物の天井崩落により、建物内の機器に影響が生じる。建物外の機器に積雪による影響が生じる可能性がある。	各建物の天井の崩落については、除雪により発生防止が可能と考えられる。 建物外の機器に対しても、除雪等による対応により機能を維持できるものと考えられる。
落雷	外部電源喪失	送受電設備の機能喪失による外部電源喪失	建物内の機器には影響しない。建物外の機器に直撃雷による影響が生じる可能性がある。	非常用ディーゼル発電機の機能維持には影響しないと考えられることから、外部電源喪失時においても電源供給は可能と考えられる。