
安全な長期運転に向けた経年劣化管理の取組 (設計経年化評価の検討)

2021年10月
ATENA

1. 背景（安全な長期運転に向けた経年劣化管理の取組）
2. 設計経年化評価について
 2. a 内的事象に係る評価
 2. b 外的事象に係る評価
3. 福島第一原子力発電所事故を踏まえた自主的安全性向上の取組
4. まとめ

1. 背景（安全な長期運転に向けた経年劣化管理の取組）

- ATENAは、各プラントにおける長期運転を安全に進めるため、物理的及び非物理的の両面から、経年劣化管理の取組を進めているところ。（2019年12月4日CNO意見交換会）
- 具体的には、下記事項について、ATENAが発刊したガイドラインに基づき、各事業者で安全対策を実施する等の取組を進めている。⇒ 3

物理的	①長期停止期間中の保全	<ul style="list-style-type: none"> • 停止期間が長期化している状況に適確に対応するため、停止期間中の特別な保全についてガイドラインを発刊（2020年9月）。 • 各事業者において停止期間中の保全をレビューし、その結果を公表（2021年7月） • また、新たに、米国80年運転の審査知見も参考に、長期運転に向けて知見拡充が望まれる事項を整理中（技術レポートを作成中）。
非物理的	②設計経年化評価	<ul style="list-style-type: none"> • 長期運転の安全性向上のため、福島第一原子力発電所事故の教訓もふまえた上で、設計経年化をガイドラインを発刊（2020年9月）。 • 各事業者において、設計経年化評価を実施中。【本日の主なご説明事項】 ⇒ 4
	③製造中止品管理	<ul style="list-style-type: none"> • 製造中止品管理を産業界で連携して対応するため、ガイドラインを発刊（2020年9月）。 • 各事業者で製造中止品管理の仕組み・体制を構築中。（ATENAによる評価結果を2021年11月目処に公表予定）

参考：安全な長期運転に向けた経年劣化管理の取組状況

	2020年度	2021年度												2022年度		
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月			
長期停止期間中の経年劣化	▼2020.9 ATENAガイド発刊 「長期停止期間中における保全ガイド」 事業者セルフチェック (ガイドに基づく安全対策の実施状況)													▼ATENA評価 (公開)	* 物理的な経年劣化管理の新たな取組として、米国80年運転の審査知見も参考に、長期運転に向けて知見拡充が望まれる事項を整理 (技術レポートを作成中)	
設計経年化評価	▼2020.9 ATENAガイド発刊 「設計経年化評価ガイド」	設計経年化評価 (着眼点の抽出・評価・対策案の調査・整理)												個別プラントで 対策要否検討	安全性向上評価 届出書に反映	
(参考) 製造中止品管理	▼2020.9 ATENAガイド発刊 「製造中止品管理ガイド」	各社仕組み・体制構築						▽ATENA評価公開 (予定) 各社運用・産業界情報共有								

2. 設計経年化評価について：背景

【設計経年化評価とは】

- 福島第一原子力発電所事故においてはタービン建屋地下階に安全系電源設備が設置されていたこと（古いプラント特有の設計）が津波による全電源喪失の一因となった。
- ATENAはこれを重要な教訓ととらえ、特に長期運転にあたっては、このようなプラント設計の古さに起因する安全上の弱点を抽出する仕組みが重要であると判断し、「設計経年化評価」として、プラント設計の相違に着目して得られる知見を安全性向上に繋げる事業者自主の取組みを導入することとした。
- 具体的には、福島第一原子力発電所事故では想定を超える外的事象により炉心損傷および格納容器破損に至り、さらには原子炉建屋の水素爆発まで発生したこと（⇨ 11）を踏まえ、外的事象の評価においては、格納容器破損後の影響緩和も含めた対策が抽出されるような評価手法を検討する。

2. 設計経年化評価について：コンセプト

【設計経年化評価の基本的考え方】

設計経年化の影響は内的事象と外的事象のそれぞれに対する安全性の差につながり得るものであるが、事象の性格から評価のアプローチは異なる。

<内的事象> ⇨ 6

- プラント間の設計情報の比較により、安全上の影響を評価すべき着眼点を抽出・評価したうえで、その影響の大きさを考慮して安全性向上対策を立案する。

<外的事象> ⇨ 9

- 外的事象に対するプラントの頑健性は、個々の設備・システムの機能のみならず配置や耐震性など多くの要素によって決定されるものであることから、内的事象の評価のように設計情報の比較から着眼点を見出すアプローチを採ることは難しい。したがって、外的事象についてはPRAやストレステストの知見を活用するなどして、設計基準を超えるハザードによって発生するシナリオを具体的に想定することにより、安全性向上対策を立案する。
- 以下に列記した認識のもと、格納容器破損後も含めた緩和を速やかに検討していく（ソフト対策を含め柔軟に検討）。
 - ✓ 外的事象の代表的なものである自然現象は、発生頻度・規模ともに不確実さの大きいものであることから、自主的な安全性向上の取組として、設計基準を超える自然現象が発生することを想定し、対策を検討しておくことが重要。
 - ✓ 事象進展の上流側（発生防止側）で対策を検討しようとすると、想定する自然現象の大きさに応じたハード対策（防潮堤嵩上げなど）が必要となる場合が多く、実効的な対策が速やかに進まないおそれ。
 - ✓ また、福島第一原子力発電所事故対応においても、設計上の想定を上回る津波などに襲われた後、あらかじめ準備されていなかった様々なソフト対応が事故の影響緩和に対して一定程度奏功。

2. 設計経年化評価について：評価の流れ

- 内の事象については、ATENAガイドラインの評価フローに基づき、BWR・PWRともに、①設計情報の比較による着眼点の抽出を実施中（2021年度末まで）
- また、抽出された着眼点に対して、②評価、③対策案の検討を順次進めているところ。 7,8
- 外的事象については、①着眼点の抽出の手法について検討中。 9,10

【ガイドラインの評価フロー概要】

① 着眼点の抽出

- ・内の事象については、設計情報の比較により着眼点を抽出。
- ・外的事象については、PRAやストレステスト等により着眼点を抽出。
(外的事象に対するプラントの頑健性は、個々の設備・系統の機能のみならず耐震性や配置等多くの要素により決定されることから、内の事象の評価のように異なるプラント同士の設計を比較し着眼点を見出すアプローチを採ることは難しい。)



② 評価

- ・①で抽出した着眼点毎に、PRA評価結果等の視点から安全上の重要性を評価。



③ 対策案の検討

- ・評価された着眼点毎の重要性に応じ、対策案を検討。
- ・考え得る対策を幅広く列挙し、対策案導入に伴う悪影響の確認や必要なリソースを整理。



④ 対策要否の検討

- ・個別プラント評価結果と対策導入による効果およびリソースを総合的に勘案し、具体的な対策を検討の上、採否を判断。



⑤ 継続的な評価

- ・事業者は、国内での新設計情報や海外の新知見等を活用し、評価を実施。

2. a 内的事象に係る評価：①着眼点の抽出（BWRの例）

- 新規制基準適合審査の申請済プラントの型式毎（ABWR、BWR5、BWR5（改良標準型））に代表プラントにて評価を行う。（3電力3プラント）
- 対象機器としては、重要度クラス1および2の安全機能を有する原子炉設置許可申請書等に記載の22系統の設備について設計の直接比較を行う。
- 各系統に対し、設計の直接比較を行い、その中で確認できた設計差異※¹について、安全機能との関連付けを行う。
- 安全性への影響が有意となり得る※²設計差異を着眼点として抽出する。

※1：安全機能に関係する設計上の差異を広く抽出。ここでは弁の個数の違いのようなレベルまで抽出しないが、後のステップで機能の信頼性を評価する際に、それらの差異は考慮されることとなる。

※2：信頼性（多重性、多様性、自動化有無サポート系機能等）、操作性等の観点を踏まえ検討する。

【着眼点の整理のイメージ（原子炉補機冷却系／原子炉補機冷却海水系の例）】

着眼点	【BWR5_Mark2】 分離型（常用系と非常用系が分離。非常用系は海水直接冷却）	【BWR5_Mark2】 完全分離型（分離型の特徴に加え、非常用系の間接ループ系による冷却）	【ABWR,BWR5_Mark1改, BWR5_Mark2改】 中間型（非常用系にて常用系も冷却。事故時に常用系の隔離）
①中間ループ系の有無 (安全機能：安全上特に重要な関連機能)	海水直接冷却	中間ループ系による冷却	中間ループ系による冷却
②常用系冷却の有無 (安全機能：安全上特に重要な関連機能)	常用系の冷却は、非常用系と分離	常用系の冷却は、非常用系と分離	常用系及び非常用系の混合冷却、非常時に常用冷却負荷隔離

2. a 内的事象に係る評価：①着眼点の抽出（PWRの例）

- 新規制基準適合審査の申請済プラントを対象に評価。（PWR：5電力16プラント）
- 対象機器としては、重要度クラス1および2の安全機能を有する原子炉設置許可申請書等に記載の設備について設計の直接比較。（PWR：19系統）
- 各系統に対し、設計の直接比較を行い、その中で確認できた設計差異※1について、安全機能との関連付けを行う。
- 安全性への影響が有意となり得る※2設計差異を着眼点として抽出する。

※1：安全機能に関係する設計上の差異を広く抽出。ここでは弁の個数の違いのようなレベルまで抽出しないが、後のステップで機能の信頼性を評価する際に、それらの差異は考慮されることとなる。

※2：信頼性（多重性、多様性、自動化有無サポート系機能等）、操作性等の観点を踏まえ検討する。

【着眼点の整理のイメージ（PWRにおける非常用炉心冷却系統の例）】

着眼点	プラント①	プラント②	プラント③	プラント⑮	プラント⑯
①高圧注入ポンプの構成 (安全機能:炉心冷却機能)	高圧注入ポンプと 充てんポンプが独立	高圧注入ポンプと 充てんポンプが独立	高圧注入ポンプ と充てんポンプが兼用	高圧注入ポンプ と充てんポンプが兼用	高圧注入ポンプ と充てんポンプが兼用
②ほう酸注入タンクの有無 (安全機能:未臨界維持機能)	ほう酸注入タンク有り	ほう酸注入タンク有り	ほう酸注入タンク無し (系統合理化)	ほう酸注入タンク無し (系統合理化)	ほう酸注入タンク有り
③再循環時の運用 (安全機能:炉心冷却機能)	手動操作で対応	手動操作で対応	自動操作で対応	手動操作で対応	自動操作で対応
⑧低温側配管と 蓄圧注入配管の管台統合 (安全機能：炉心冷却機能)	分離	分離	分離	統合	分離

灰色ハッチング：安全性への影響が有意ではない設計差異として、着眼点として抽出しない。

2. b 外的事象に係る評価：対策検討の考え方

- 対策の検討にあたっては、講じている設計上の配慮などに拘ることなく、物理的に起こりうる厳しいプラント状況（シナリオ）を想定する（例：竜巻防護対策の無力化、火災防護区画の全損）。
- 個々の事象・プラントに特有の条件（アクセスルートへの影響など）を踏まえつつ着眼点を抽出し、炉心損傷後の緩和対策を中心に対策を検討する。
- 原子炉建屋に漏洩した水素への対策などを含めて抽出すべく、格納容器破損後の状態も含めて想定し、緩和対策を検討する。
- 着眼点抽出の手法はPRA等の評価手法の整備状況や事象の特性を踏まえて選定することを基本とするが、重要な事象について、手法を限定せず現状取り得るアプローチで対策を検討していく。
- なお、上記のアプローチは必ずしも設計の経年化影響（プラント間の設備の相違）に着目したものではないが、抽出される対策には設備の相違に起因するものも含まれるものと想定している

- 効果的に着眼点を抽出するため、外的事象それぞれの特性を踏まえ、適切な検討手法を選定し評価を行う。（現在、各外部事象について例題を用いて評価手法を検討中）

● 外的事象の特性を踏まえた検討手法の考え方

地震	津波	竜巻	内部火災	内部溢水
<p>影響範囲が広範に渡ることから、プラント応答を網羅的に評価できる PRAやストレステストの知見を利用することが有効であると考えられる。</p>		<p>影響範囲が限定的であることから、過去の海外のPRAからの知見などを活用し、決定論で影響範囲を設定して評価することが有効であると考えられる。</p>		

● 検討手法の例

- 地震：**プラント間比較やドミナントシーケンスの分析**（PRAの知見を活用）
- 津波：**建屋浸水以降のプラント応答の現実的な評価**（ストレステストの知見を活用）
- 内部火災：**過去の米国IPEEEでリスク上重要とされている火災区画の全焼を仮定**
- 竜巻：**屋外設備が全て機能喪失することを仮定**（竜巻防護ネット等も破損することを想定）
- 内部溢水：津波との親和性が高いと考えられることから、津波評価を踏まえて検討

3. 福島第一原子力発電所事故を踏まえた自主的安全性向上の取組 (福島第一事故中間とりまとめ)

- 福島第一事故中間とりまとめでも指摘された水素対策を、設計経年化検討から導出される具体策の一つとして、先行して検討中。**(まずはBWRを対象)**
- 格納容器破損時には、炉心損傷時に発生した水素と希ガスが同時に原子炉建屋へ漏えいすることへの対応が課題の一つであることは認識しており、先行的にBWRを対象に検討中。
- 検討内容：
 - 格納容器破損後の対策を検討する上での想定すべき事象の検討
 - ✓ 起因事象、水素発生量、破損に至る時間、破損の程度、等
 - ソフト対策を中心とした、安全性向上に繋がる具体的な対策の検討
 - ✓ 環境への影響低減、原子炉建屋内での水素爆発の可能性及び作業員への被ばく低減等、を考慮
 - ✓ 格納容器からの漏えいを低減させるための対策だけでなく、原子炉建屋に漏えいした水素等を原子炉建屋外に排出するための対策、等

4. まとめ

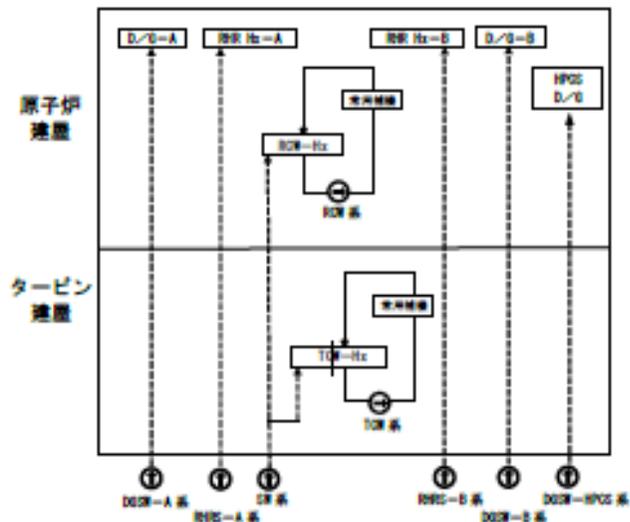
- ✓ ATENAは、長期運転を安全に進めていくため、設計経年化評価の取組を進めているところ。加えて、福島第一原子力発電所事故を踏まえた自主的安全性向上の取組として、事故調査の対応も並行して検討している。
- ✓ 設計経年化評価のうち、内的事象を対象とした評価については、ATENAガイドラインに示したプロセスのとおり検討を進めており、その進捗状況を具体例とともにご説明した。
- ✓ 他方、外的事象を対象とした評価については、具体的な評価の進め方についていまだ検討中の状況であり、今後精力的に取り組み検討を加速していく。
- ✓ 本日お示した設計経年化評価の基本方針および具体的な検討の方法ならびに福島第一原子力発電所事故調査の対応について、規制委員および規制庁と、今後もCNO意見交換会の場で意見交換させていただけるとより有効な取組みにつながるものと考えている。

参考資料

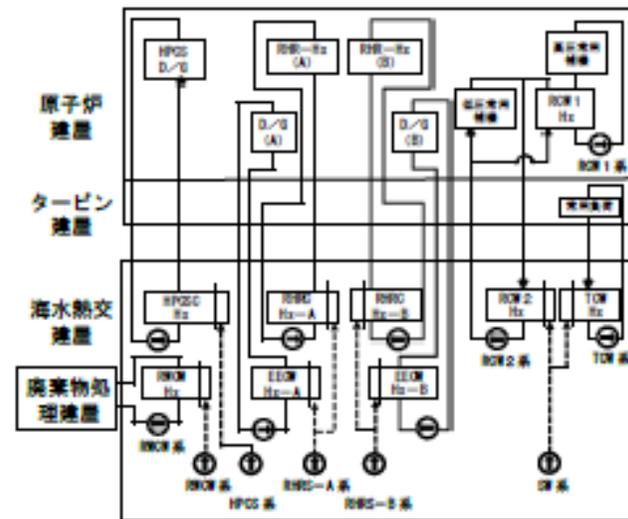
- 各系統で整理された着眼点（下表①②）に対して、確率論的リスク評価、決定論的安全解析等の観点から評価。
- 抽出した着眼点に対して評価項目毎に安全性向上への影響を整理し、対策実施を検討する着眼点を決定（下表①②）。

【評価の観点イメージ（原子炉補機冷却系／原子炉補機冷却海水系の例）】

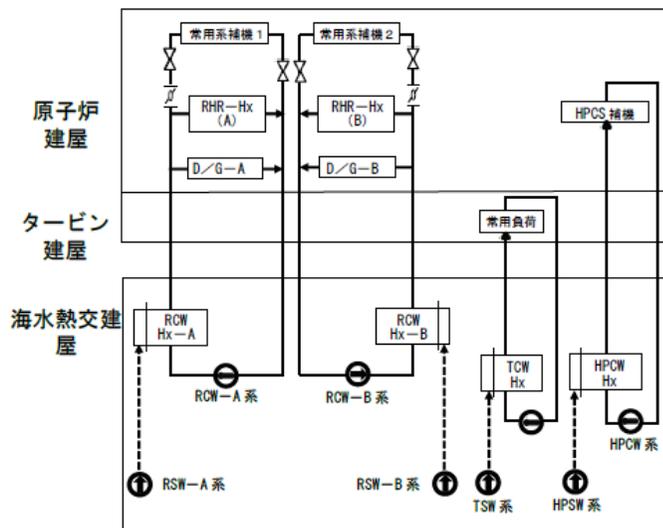
評価項目	①中間ループ系の有無	②常用系冷却の有無
①確率論的リスク評価	直接海水冷却の方が、構成する機器が少なくなるため、非信頼度は低く抑えられる。	中間ループを有した完全分離型より、中間型は常用系冷却を行っている、常時ポンプが運転しているため、非信頼度が低く抑えられる。 一方、非常時に常用系負荷の隔離インターロック作動が必要であり、その分リスクに寄与する。
②決定論的安全解析	事象進展および炉心冷却の観点で有意な差はなし	事象進展および炉心冷却の観点で有意な差はなし
③その他安全上影響の観点	熱交換器からの漏えいに備えて海水側が高圧になるようにしている。直接海水冷却の場合、熱交換器の漏えいかつ圧力差がなくなった場合、放射性物質の環境放出のポテンシャルとなる。	影響なし (関連なし)
対策案検討対象	対象 ・中間ループ系の信頼性向上 ・直接海水冷却における放射性物質の環境への放出防止の信頼性向上	対象 ・常用系負荷隔離の信頼性向上



分離型系統構成図



完全分離型系統構成図



中間型系統構成図

- 各系統で整理された着眼点（下表①②③）に対して、確率論的リスク評価、決定論的安全解析等の観点から評価。
- 抽出した着眼点に対して評価項目毎に安全性向上への影響を整理し、対策実施を検討する着眼点を決定（下表③）。

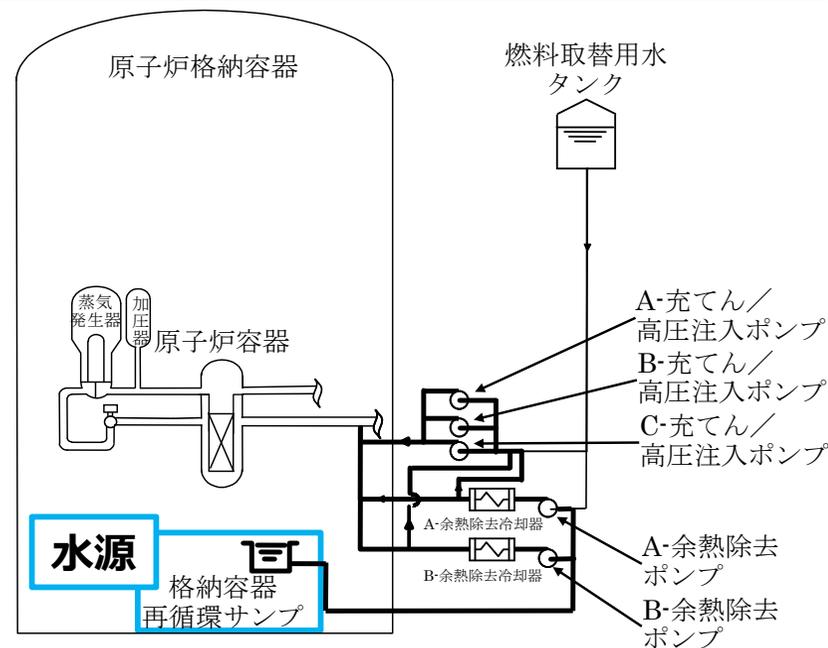
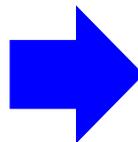
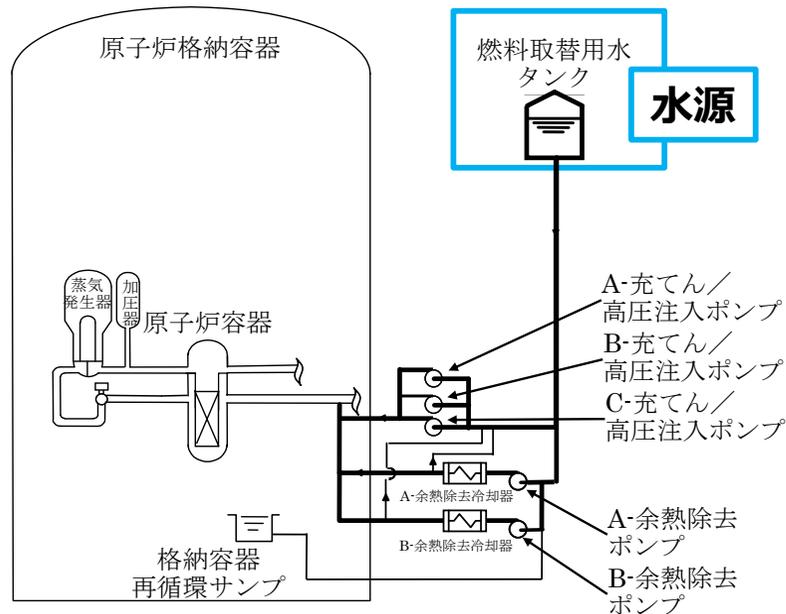
【評価の観点イメージ（PWRにおける非常用炉心冷却系の例）】

評価項目	着眼点① 高压注入ポンプの構成	着眼点② ほう酸注入タンクの有無	着眼点③ 再循環時の運用	...
①確率論的リスク評価	CDFへの影響は非常に軽微	CDFへの影響は非常に軽微	自動操作の方がCDFが10%程度低減	...
②決定論的安全解析	事象進展および炉心冷却の観点で有意な差はなし	事象進展および炉心冷却の観点で有意な差はなし	事象進展および炉心冷却の観点で有意な差はなし	...
③放射線が環境に与える影響	影響なし（関連なし）	影響なし（関連なし）	影響なし（関連なし）	...
④ヒューマンファクタ	影響なし（自動起動のため）	影響なし（自動起動のため）	自動操作の方が操作性向上（運転員負荷低減）に期待できる	...
⑤他プラントでの経験及び研究結果の利用	該当する知見なし	該当する知見なし	該当する知見なし	...
対策案検討対象	否 ・いずれの評価項目も ・有意な影響なし	否 ・いずれの評価項目も ・有意な影響なし	対象 ・自動操作はリスク低減 ・運転員負荷低減が期待	...

上記の場合、着眼点③についてハード面・ソフト面の対策案を検討する。（例は次項参照）

参考：PWRにおけるECCS再循環時の運用と対策案

【ECCS再循環切替の方式の違い】



- ① LOCA事象等が発生した際には、非常用炉心冷却系（ECCS）が動作。
燃料取替用水タンクを水源として、炉心注水を行う。

- ② 炉心注水に伴い、燃料取替用水タンク水位が低下するが、「燃料取替用水タンク水位低」となれば、格納容器再循環サンプを水源に切替え、炉心注水を継続する。

【各プラントにおける水源切替に伴う弁・ポンプ等の操作】

- ・自動：高浜3, 4号機、大飯3, 4号機 ・半自動：敦賀2号機、泊3号機 ・手動：その他プラント

【対策案のイメージ】

「ハード対策の例」

- ・再循環手動切替から再循環自動切替への改造

「ソフト対策の例」

- ・再循環切替に係る、運転員の教育・訓練の強化