

2013年秋の大会  
標準委員会セッション3(システム安全専門部会)  
「効果的・効率的なアクシデントマネジメントによる総合安全性の向上」



## (2) SAM実施基準について

---

平成25年9月5日

東京大学大学院 工学系研究科

岡本 孝司(SAM分科会 主査)

( 講演代理 原子力安全推進協会 )  
( 鎌田 信也(SAM分科会 幹事) )



## 制定の背景

- 国は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、IAEA提出報告書で外的事象に着目したシビアアクシデント(SA)の発生防止及びアクシデントマネジメント(AM)の充実、強化に言及。
- 原子力規制委員会(H24年9月発足)は、福島第一原子力発電所事故や海外の規制動向を踏まえ、従来の安全規制(DBA)の強化や重大事故(SA)への対策を含めた規制基準の骨子案をH25年2月に公表。炉規法に基づく規制委規則としてH25年7月8日から施行。
- 日本原子力学会では、原子力発電所を取り巻く外的事象及び内的事象を含めた全事象に起因するリスクを適切に評価、把握した上で、SAのリスクを合理的に達成可能な限り低減するため、アクシデントマネジメント整備の考え方、設備改造または追加、手順書作成に関する技術要件を纏めた標準制定に着手(H23年12月)。



## 分科会の構成、活動経緯

- シビアアクシデントマネジメント(SAM)分科会の位置付け  
日本原子力学会 標準委員会システム安全専門部会傘下の分科会として、SAM実施基準に関して産官学の専門家により学術的に公平、公正な審議を実施。
- 分科会主査 - 岡本教授(東大)、同副主査 - 杉山主幹(JAEA)
- 分科会の委員構成  
PRA、安全分野等を専門とする学識経験者、学術機関、規制機関、電力及びメーカー等の関係者(全21名)
- 分科会活動、標準の審議状況  
分科会(全17回)で標準(案)を策定後、システム安全専門部会の審議を経て、現在、標準委員会における書面投票を実施中。
- 今後の予定  
パブコメを経てH25年12月の制定を目指す。



## 深層防護から見た福島第一原子力発電所事故

- 深層防護の第3層(設計基準事故)については、設計津波の裕度設定に課題はあったものの、その基本的考え方については問題は無かった。
- 福島第一では、設計基準を越える事象は想定済みであったが、その場合の対策系であるアクシデントマネジメントが不十分であった。一方、福島第二では設計基準を超える津波により最終ヒートシンク機能喪失に陥ったものの、AMに基づいて安全停止への移行を成功させた。



## 福島第一原子力発電所事故の反省

- 内的事象に対するPRAをベースとしたAMに留まっていた。  
→ 内的事象の設定シナリオだけでなく、外的事象及びこれらの重畳事象等の考慮が必要。
- 発生確率の小さい事象はソースチームが大きくても考慮していなかった。→ 複数プラント、社会インフラ等に影響を及ぼす大規模な損傷(シナリオを超える事象)についても考慮が必要。
- 安全機能の重大な喪失を想定した対策が取られていなかった。  
→ 津波等に伴う長時間の電源喪失、最終ヒートシンク機能喪失等の広範囲の従属故障の発生、対策の考慮が必要。
- AMに対する教育・訓練が十分ではなかった。  
→ ハードウェアを補う教育・訓練を含むソフトウェアの整備等、柔軟なマネジメントの準備が必要。
- SAに対する規格基準類が整備されていなかった。  
→ 上記の要求を満足する規格基準類の整備が必要。

## 深層防護とAMの対象範囲(WENRA)

- 深層防護との関連

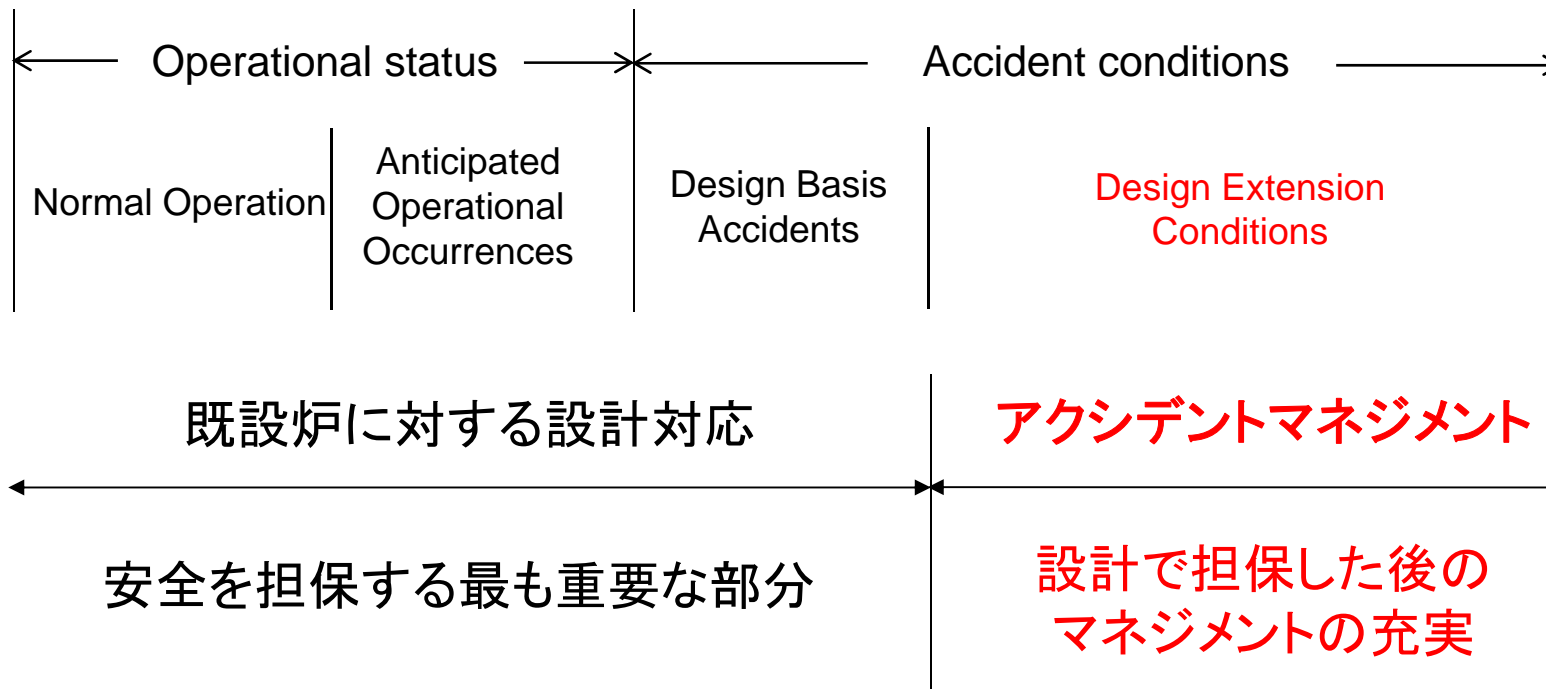
深層防護は5段階に分けられ、各防護レベルが合理的実行可能な限り独立した機能、効果(Independent Effectiveness)を有する。アクシデントマネジメントは、深層防護のレベル3bの設計拡張状態(DEC)及びレベル4への対応を対象とする。

深層防護レベル	プラント状態	対策系
レベル1	通常運転	—
レベル2	異常な過渡変化	運転の制御、状態監視
レベル3	3a 設計基準事故(単一起因事象)	安全系、事故手順
	3b 設計拡張状態(SBO、ATWS等の多重故障)	工安施設、事故手順
レベル4	想定炉心溶融事故	炉心溶融緩和の工安施設、管理
レベル5	所外緊急時対応レベル	防災活動

(出典: Safety Objectives for New Power Reactor Reactors Study by WENRA RHWG より抜粋)

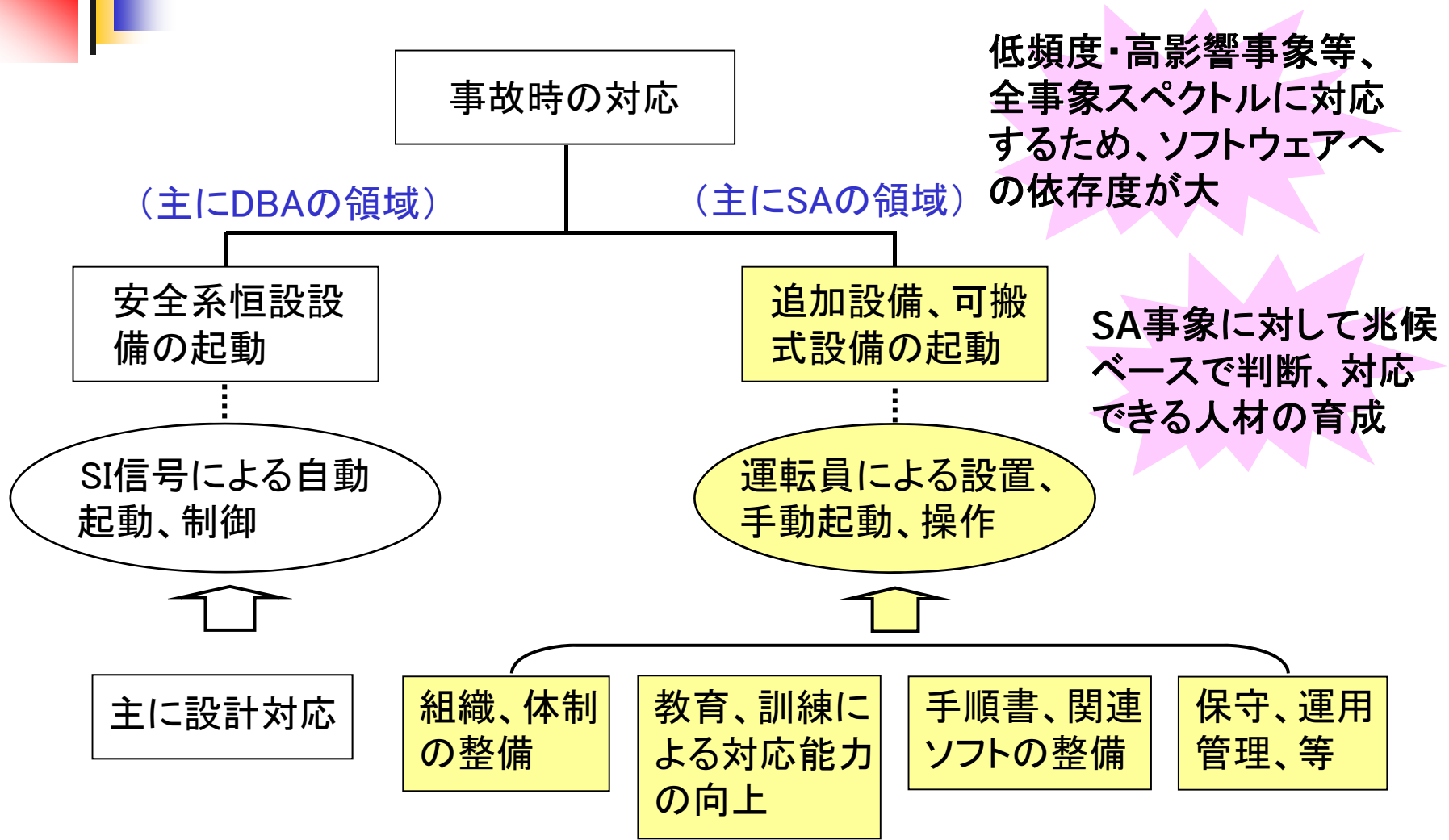
## 深層防護とAMの対象範囲 (IAEA)

Plant states (considered in design)



(出典:IAEA SSR-2/1(2012)より抜粋)

# アクシデントマネジメントの特徴







## SAM実施基準策定の目的、位置付け

- プラント固有のリスク評価  
各個別プラントに対して、脆弱性抽出のためのリスク評価を行う。プラント固有のリスク評価にあたっては、PRAだけでなく、定量化が困難な場合にもストレステストや専門家による工学的判断も活用して、説明性を担保する。
- アクシデントマネジメントの最適化  
複雑多岐に亘るシビアアクシデントに対して、合理的かつ実行可能なマネジメントを行うために、事象進展の予測、対策系の有効性評価等に基づきハード及びソフトのベストミックスを検討する。
- マネジメント能力の維持向上  
プラント挙動、作業環境、人的因子の観点で可能な限り現実的な教育・訓練を実施する。また、低頻度・高影響事象等についても対応策の討論、思考訓練を通して、危機意識を高めると共に対応能力の更なる向上に努める。



## アクシデントマネジメント整備の基本的な考え方(1/2)

### ■ アクシデントマネジメントの目的

設計基準事象を超え、炉心及び使用済燃料プール内の燃料が大きく損傷する事象に対して、起因するリスクを適切に評価、把握した上でシビアアクシデントに至る可能性を低減し、またシビアアクシデントに至った場合でもその影響を緩和するためにハードウェア、ソフトウェアを活用したマネジメントを実施する。シビアアクシデントの事象進展の各段階における具体的な目的は下記の通り。

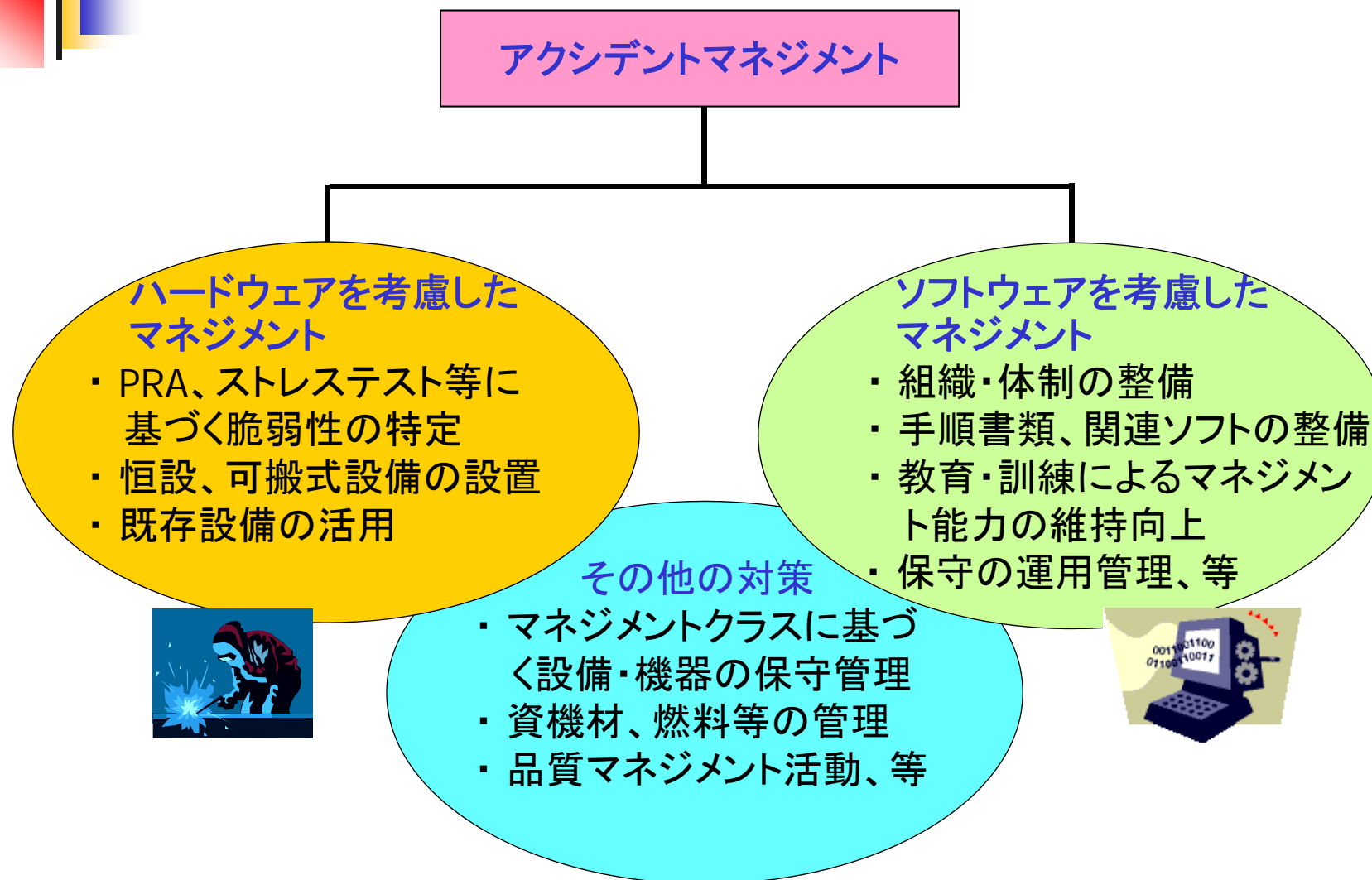
- シビアアクシデントの防止
- 事故進展の抑制
- 格納容器の健全性確保
- 放射性物質の放出の最小化
- 長期安定冷却状態の確立



## アクシデントマネジメント整備の基本的な考え方(2/2)

- **アクシデントマネジメントの方針**  
アクシデントマネジメントでは、プラントの事象進展、事故収束に向けた的確な対応が要求され、ハードウェア(設備、機器等)だけでなくソフトウェア(教育・訓練、手順書、組織等)、両面から安全性を担保することが肝要。
- **ハードウェアを考慮したマネジメント**  
設計に含まれる安全余裕や安全設計上想定した本来の機能以外にも期待しうる機能、そうした事態に備えて新規に設置した機器、等を有効に活用。リスクの抽出にあたっては、PRA、ストレステスト等により設備、機器の脆弱性を特定し、設備改善も含めた適切な対策をマネジメントクラスに応じて策定。
- **ソフトウェアを考慮したマネジメント**  
アクシデントマネジメントは、運転員または所員の操作、活動等に大きく依存しており、設備改善等のハードウェア対応だけでなく、教育・訓練、組織、手順書の整備等のソフトウェアの整備が重要。特に教育・訓練については、維持向上のスパイラルアップを図りながら、シビアアクシデント時の対応能力を確保。

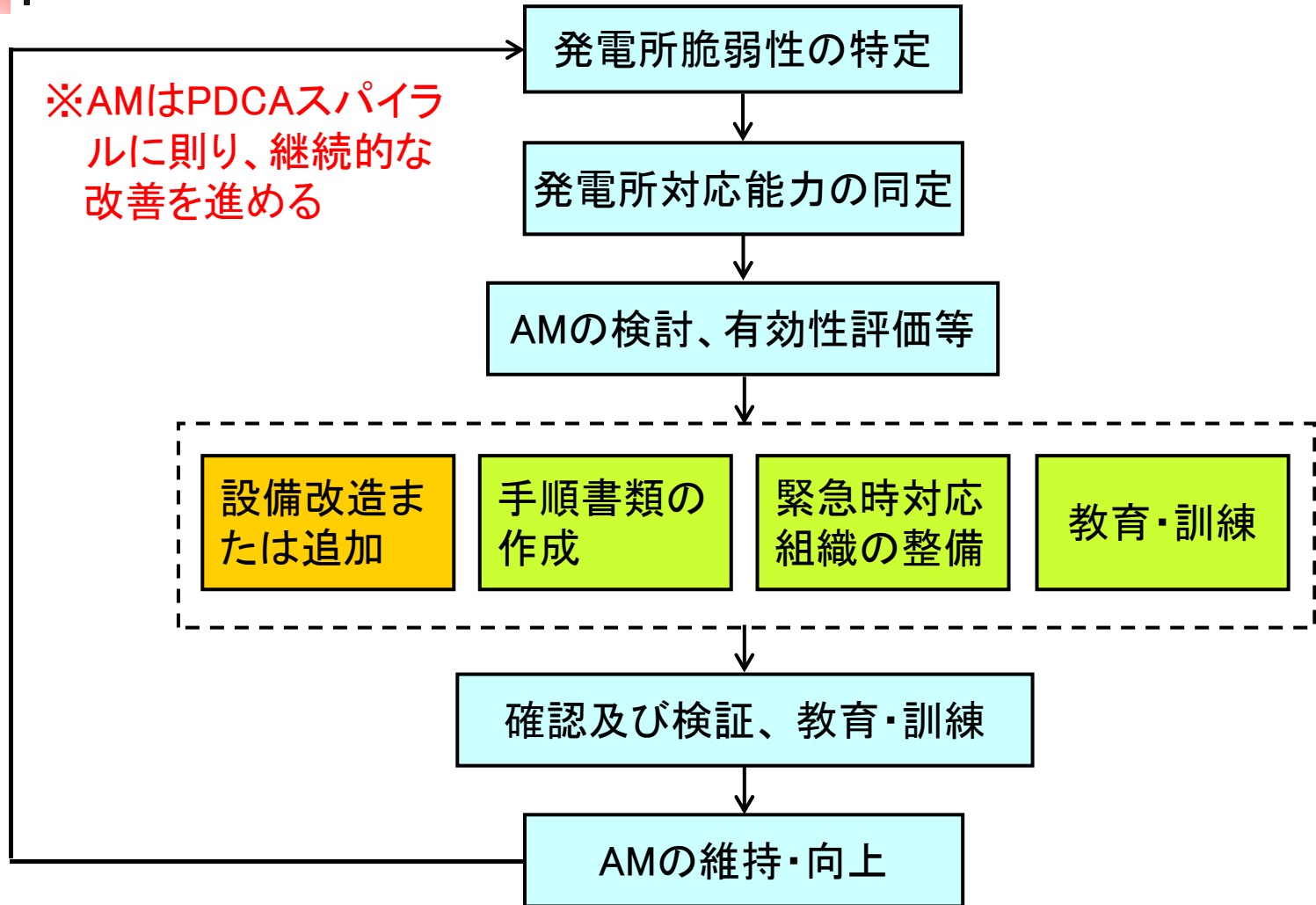
# アクシデントマネジメントの構成

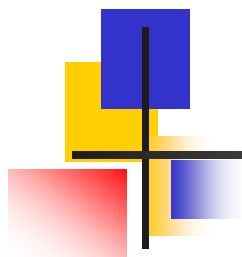


# アクシデントマネジメント策定のブロックチャート

(品質マネジメント活動)

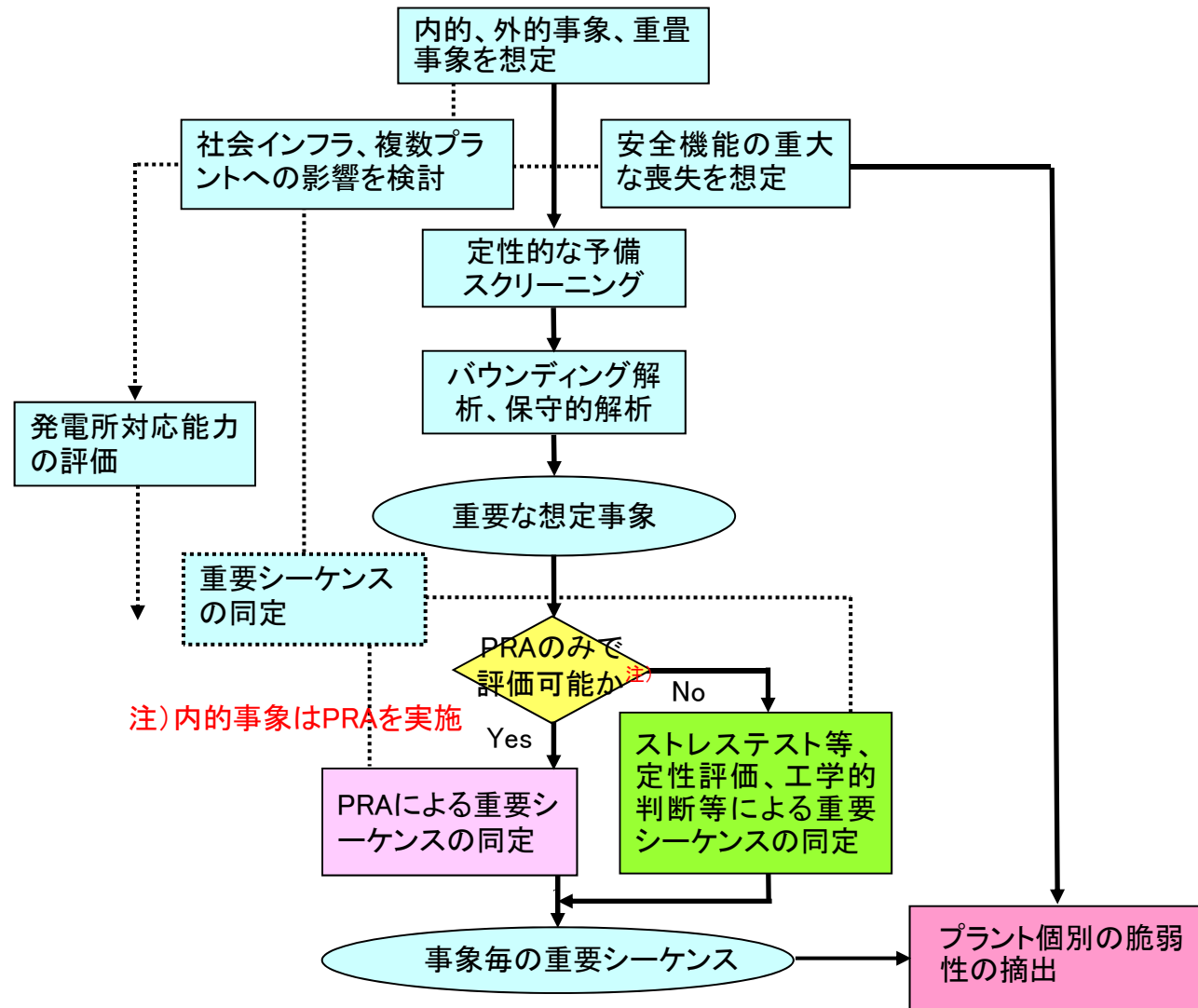
※AMはPDCAスパイラルに則り、継続的な改善を進める



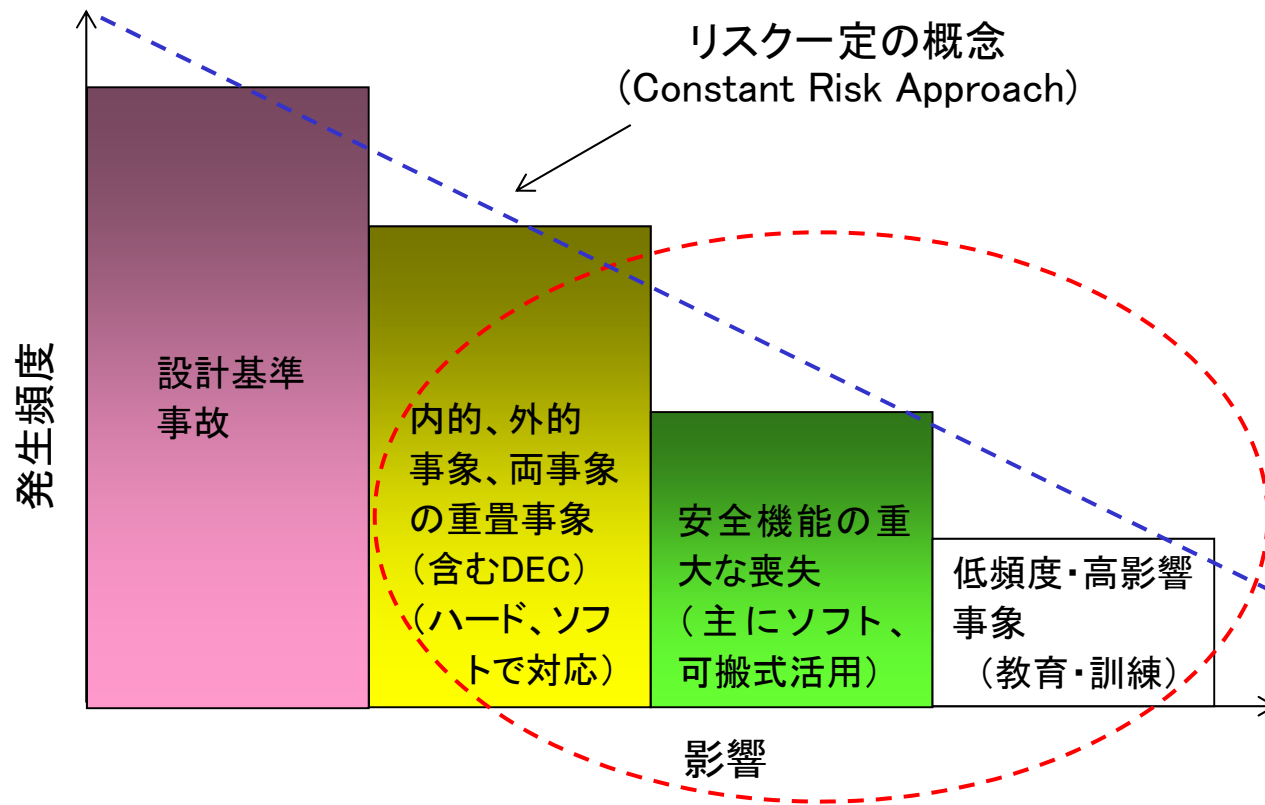


# SAM実施基準のポイント

# 発電所脆弱性の特定(脆弱性抽出ロジック)



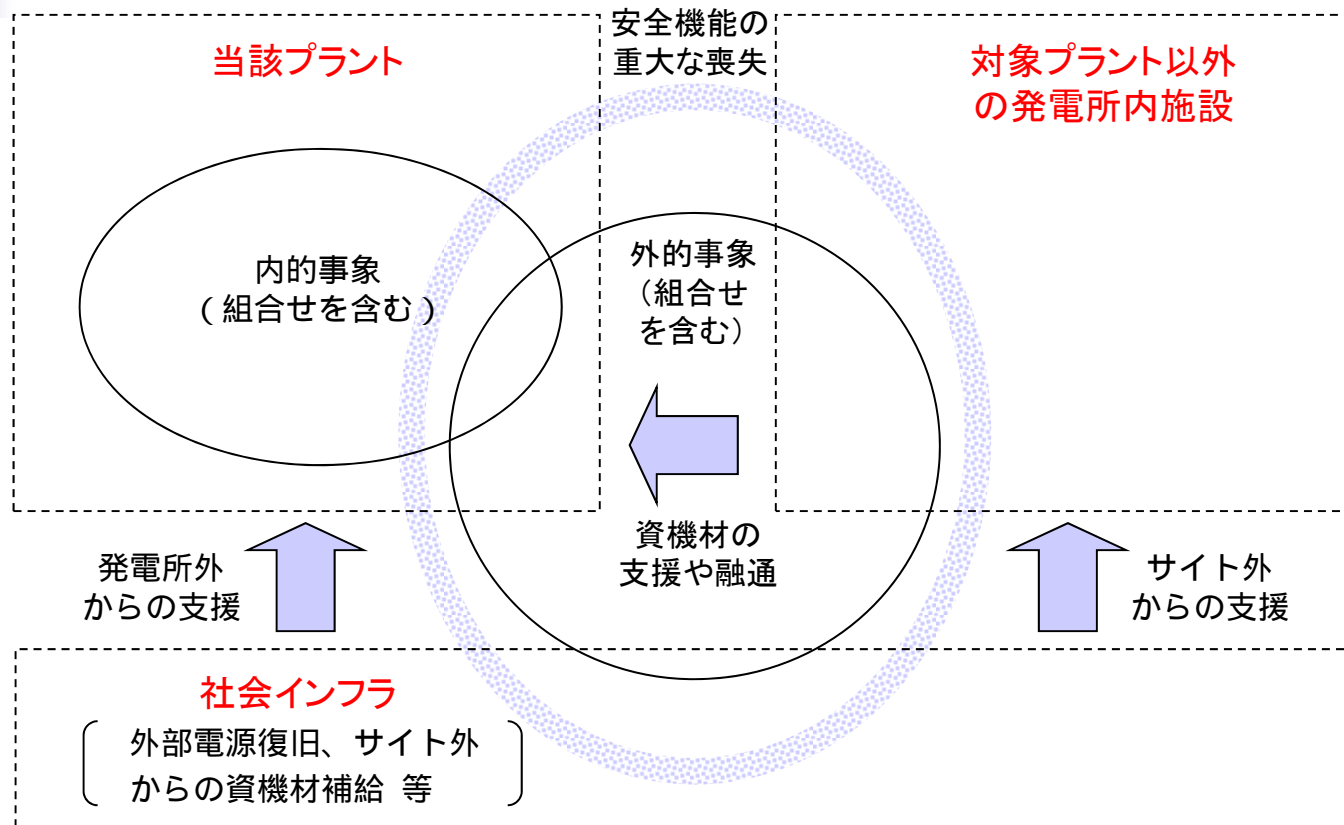
# アクシデントマネジメントの対象事象



事象のカテゴリーとアクシデントマネジメントの対象範囲



## 事象想定の方法(各事象の相互関係)



安全機能の重大な喪失は、外的事象が極めて大きい場合、影響がサイト外の社会インフラに及ぶ可能性を想定し、長期に及ぶ外部電源復旧やサイト外からの資機材搬入が困難になる事態を考慮。

## 外的事象(外部ハザード、内部ハザード)の例

- 事象の想定について  
 内的事象と外的事象及びこれらの重畳事象、広範な安全機能の喪失も想定。また、低頻度・高影響事象については教育・訓練で考慮。
- 想定事象の抽出(棄却)方法  
 影響有無に関する定性的判断(プラントに近接した場所で発生しない、事象進展が遅く対応の時間裕度がある、等)を実施、例としてIPEEEガイドランスでは発生頻度 $10^{-5}$ /炉年で考慮の要否を判断。

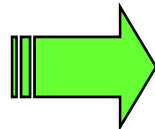
内部ハザード	外部ハザード	
	自然ハザード	人為ハザード
内部火災 内部溢水 内部ミスイル 内部爆発 重量物落下 化学物質放出、等	地震、津波 外部火災 強風 火山噴火、隕石落下 生物学現象 異常気象、等	発電所外での爆発 発電所外での化学物質放出 航空機落下 意図的な不法行為、等

## PRAによるプラント脆弱性の抽出(判断基準)

- 重要シーケンスの同定、プラント脆弱性の特定  
プラントの重要な安全機能への影響度についてPRAに基づき重要シーケンスを同定、設備及び運用等の実態を踏まえて総合的にプラントの脆弱性を抽出
  - ① 事故シーケンスグループの類型化  
炉心損傷の終状態に至るプラント応答、プラント・システムの損傷状態の類似性でグループ化し、互いのグループの独立性(シーケンスの重複無し)を確認
  - ② 重要シーケンスの特定及び脆弱性の抽出  
重要シーケンスグループから発生頻度、全CDFに占める寄与度に基づき重要シーケンスを抽出、リスク寄与度の高い緩和系、操作等を抽出

### 10<sup>-6</sup>/炉年の導出根拠

- ・原安委専門部会の安全目標  
CDF(全リスク) < 10<sup>-4</sup>/炉年
- ・学会標準(リスク情報活用)  
内的事象は全リスクの1/10
- ・約10のシーケンスグループ



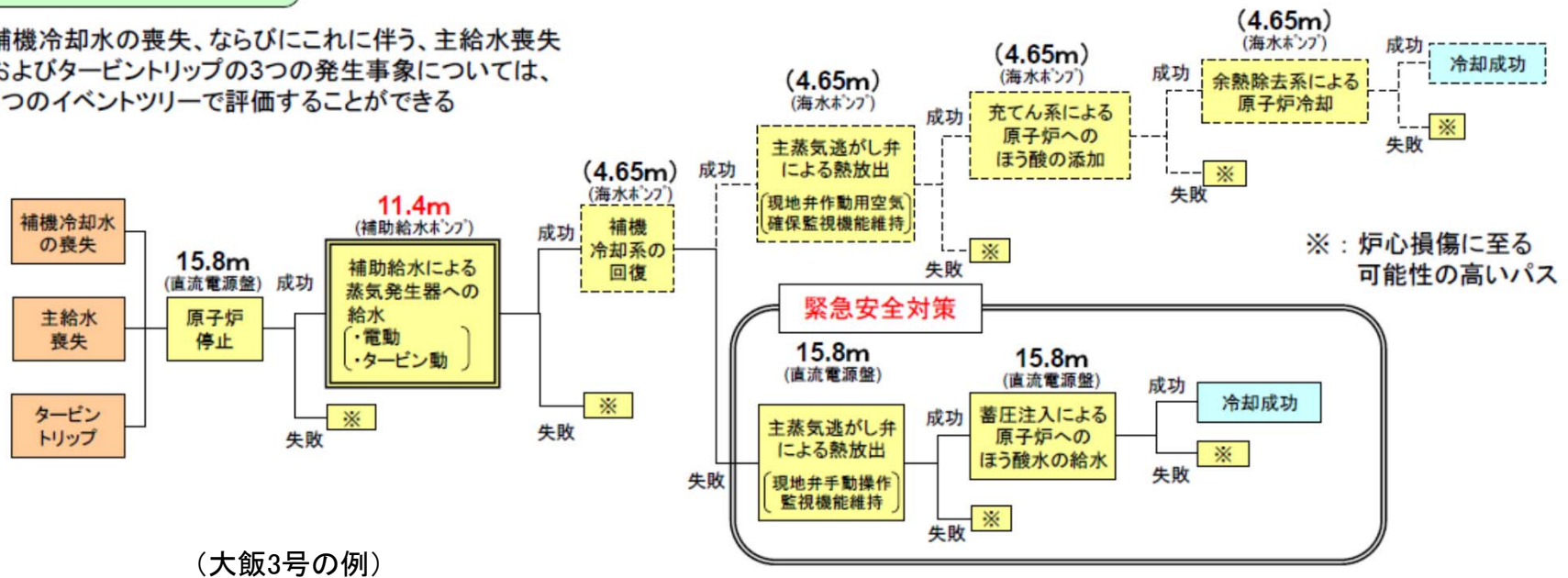
### 重要シーケンスグループの判断基準(案)

- ・「CDF ≥ 10<sup>-6</sup>/炉年」 或いは 「CDF ≥ 全CDFの20% かつ CDF ≥ 10<sup>-7</sup>/炉年」であれば重要シーケンスグループと判断
- ・上記以外は影響度も考慮して対応の要否を判断

# ストレステストによるプラント脆弱性の抽出(例)

## 燃料を冷却するためのイベントツリー

補機冷却水の喪失、ならびにこれに伴う、主給水喪失およびタービントリップの3つの発生事象については、1つのイベントツリーで評価することができる



緊急安全対策後、想定津波高さ(2.85m)に対して約4倍(11.4m:補助給水ポンプ)の高さが津波に対するクリフエッジと再評価された(対策前は1.6倍 4.65m:海水ポンプ)。



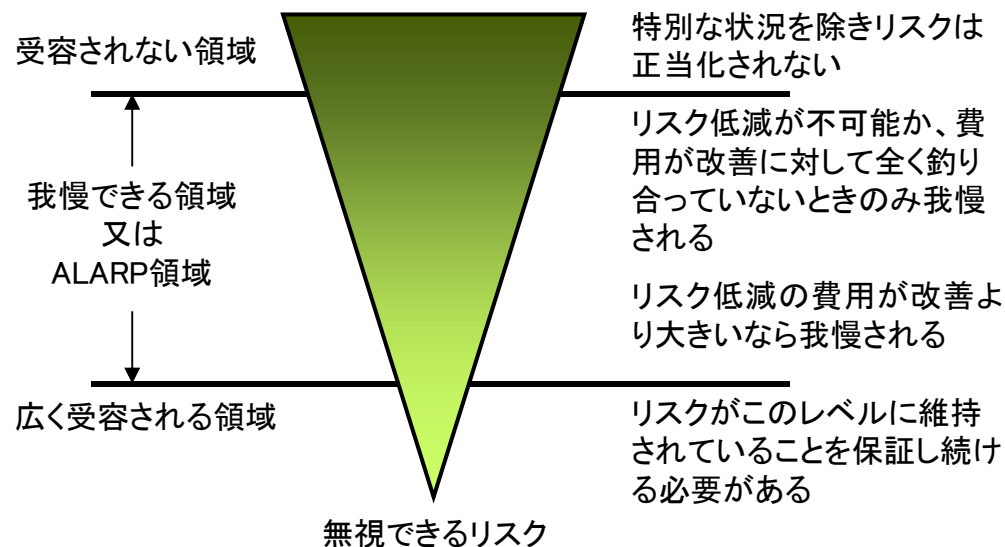
## リスクに基づくアクシデントマネジメントの考慮要件

- アクシデントマネジメントの考慮要件
  - 現場へのアクセスルート、時間、作業環境上の制約及び使用可能な資機材の制約等を考慮、等。
  - 隣接プラントからの支援等の活用は、同プラントへの悪影響を回避
- アクシデントマネジメントの体系的評価
  - 対策実施の効果、信頼性、悪影響の可能性等を考慮し、最適なアクシデントマネジメントとしての優先順位を評価。
- アクシデントマネジメントの有効性、成立性の確認
  - 熱水力解析コードを用いる場合は最適評価を原則とし、モデルの不確定性を考慮した上でリスク低減効果、悪影響の可能性も考慮
  - 外的事象の対応を目的とする対応方策に関しては、当該設備が外的事象の影響に対して適切な耐性を有するかを評価、等。

## ALARPに基づくアクシデントマネジメントの考慮要件

- 合理的で実行可能なAMの考え方

限られた発電所のリソースで安全性確保に有効でかつ合理的な対策を選定する。ALARP (As Low As Reasonably Practicable) の思想では、「我慢できる領域」はリスクが合理的に実行可能な限り低くなっている領域で、社会的に受容される領域を指す(受容性を評価する際には、専門家判断や決定論的考察を踏まえつつ、コストと利益の定量評価を活用)。



**米国 (NEI) のSA緩和代替策の例**  
米国のSA緩和代替策では、所外及び所内の被ばくコストと経済性コストを評価し、コストベネフィットでの有益性を判断基準として複数の代替策から方策を決定 (Value-Impact評価もALARPの思想)

出典:「英国HSEのリスクレベルとALARP」  
原子力安全白書(H14年度版)

## マネジメントクラスの必要性

- マネジメントクラス分類の必要性

内的事象から低頻度・高影響事象に至る迄、広範な事象を対象に適切かつ柔軟なマネジメントを行うため、**Graded Approach**の考え方に基<sup>づ</sup>き、リスクレベル等に応じて最適なハードウェア、ソフトウェアを重点的に活用する。

- マネジメントクラス活用の具体例

シビアアクシデント時に活用ニーズが高い**可搬式機器の運用・保守管理**(点検頻度、確認内容)、応用力が要求される**要員の教育・訓練計画**(実施頻度、教育レベルの確保)の策定、**手順書の整備**(リスク影響度、事象継続性を考慮した措置要求、等)について、リスクレベル等に応じた科学的かつ合理的なマネジメントを実施。



## マネジメントクラスのカテゴリ

### ■ 外的事象、内的事象による影響伝播を想定した場合のカテゴリ例

必要な設備改造、追加を行うハード対策、設備の有効活用を目的とした手順書類の整備、AM実施に向けた組織の整備、教育・訓練等を行うソフト対策があり、リスク影響度に応じて各マネジメントのカテゴリ分類を実施。

#### 【マネジメントカテゴリの設定例】

カテゴリ	定義	BWRのAM例
カテゴリ-1	重大なリスクの影響に対応するAM (外的事象条件下で機能担保)	代替反応度制御、電源車、消防車 耐圧強化ベント、これらに関する教育・訓練、等
カテゴリ-2	考慮すべきリスクの影響に対応するAM (内的事象条件下で機能担保)	手動スクラム、F&B、CVスプレイ手動、 電源融通、これらに関する教育・訓練、等
カテゴリ-3	検討しておくべきリスクの影響に対応するAM (上記カテゴリ以外)	DW冷却系、原子炉冷却材浄化系による代替除熱、外電復旧、これらに関する教育・訓練、等

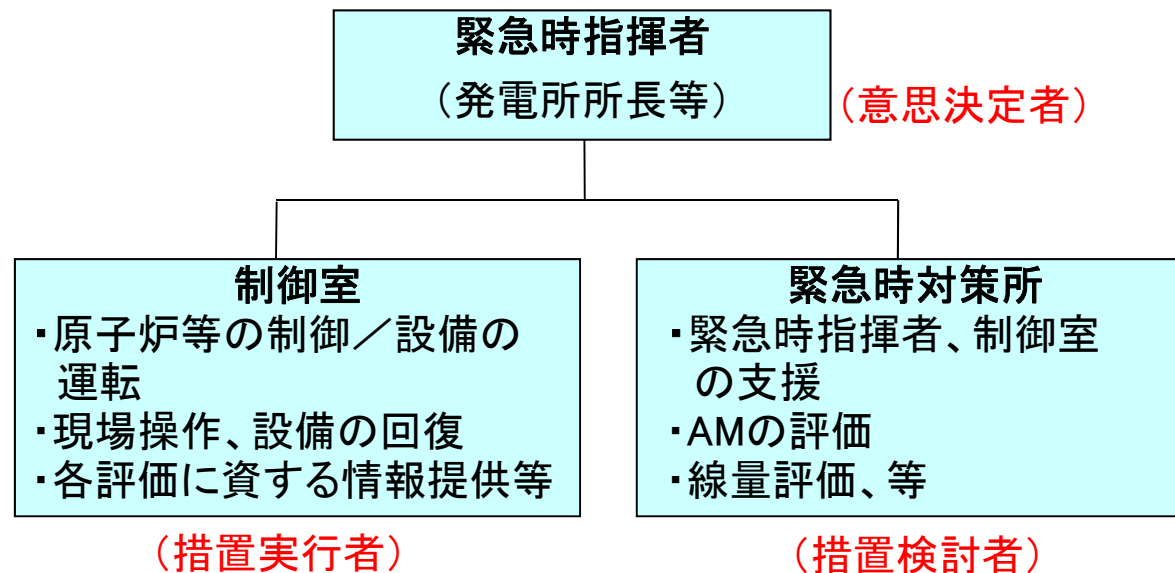
- ・耐震性、環境性、独立性、位置分離性等に基づき上記カテゴリに応じたマネジメントを実施
- ・安全文化を高レベルに維持するために、教育・訓練、運用管理の内容、頻度を設定



## 緊急時対応組織の体制

### ■ 組織の構成

所内の緊急時対応組織の技術的要素は、緊急時指揮者（発電所所長等）をトップに制御室、緊急時対策所から構成。事業者の本店、他サイト、社外組織からの支援を確立。



※DBA、SA、大規模損傷、防災と事象進展に応じて、シームレスな活動の移行を実施



## AMにおける教育・訓練の考え方

- 運転員・保守員をはじめとする全所員の経験と行動品質の向上を図ることでマネジメント能力を向上させる。また、SATの原則に則り、役割に応じたマネジメント能力を保証すると共に、継続的に改善を図る。各対象者に必要な能力は下記の通り。
  - 意思決定者  
専門知識の他、発電所全体を俯瞰し、リスクを判断する能力、SAの総合知識、措置検討者グループとの緊密な連携能力、
  - 措置検討者  
プラント状態の伝達、機器・システム、SA及びAMに関する専門知識
  - 措置実行者  
プラント状態の把握、必要な機器、システムの作動方法の知識
- 上記の役割に応じた必要な能力を有する要員アサインの確認、定期的な訓練の実施と共に新知見を継続的に反映するための教育計画を実施することが重要。
- 各要員の能力の維持、向上のために机上訓練、総合訓練を行い、PSRで10年毎の計画見直しを実施。訓練項目は、①事故の診断と予測、②防護対策の立案、③防護対策の実施、④監視と対策の更新、の4項目から構成される(海外事例参照)。

## 管理職、上級運転員の訓練項目及び内容(IAEA)

訓練項目	訓練内容
(a) 事故の診断と評価	炉心、格納容器及び安全上重要な系統の状態の評価
	事故における重要事象の時間履歴(発生時刻、継続時間等)に関する予測
	炉心損傷状況の予測
	予想される水素燃焼又は圧力容器損傷の起因による圧力及び温度の上昇の予測
(b) アクシデントマネジメントの立案	炉心損傷を防止又は抑止、格納容器破損の防止、放射性物質の放出を低減するために必要なアクシデントマネジメントを選択し、評価
	PRA の評価結果などあらゆる有用な知見を活用して改善活動の優先度を設定
(c) アクシデントマネジメントの実施	安全系の冗長性、多様性及び独立性を回復するための積極的な活動の実施と運転員の努力の蓄積
	炉心損傷を防止又は抑止し、格納容器破損を防止し、放射性物質の放出を低減するためのアクシデントマネジメントを実施
(d) アクシデントマネジメントの監視と更新	運転員の実施したアクシデントマネジメントの有効性を監視
	炉心及び安全系の性能をさらに劣化させる可能性が高い問題を評価

## AMの教育・訓練に関するNEIの提言

項目	措置の実施者	措置の検討者	意思決定者
A. 新任の ERO 職員に対する初期 SAM 訓練			
1. 訓練様式	クラスルーム	クラスルーム	クラスルーム
2. 訓練時間	8-12 時間	32-40 時間	12-16 時間
3. 評価方法	試験及び机上実習	試験及び机上実習	試験及び机上実習
B. リフレッシャー/再認証者の訓練			
1. ERO 個人を対象とした実施頻度(訓練実施の間隔)	3 年	3 年	3 年
2. 訓練様式	クラスルーム	クラスルーム	クラスルーム
3. 訓練時間	2-4 時間(実習を除く)	4-8 時間(実習を除く)	2-4 時間(実習を除く)
4. 評価方法	机上実習	机上実習	机上実習
5. 改善方法(訓練、実習、他)	自習及び試験	自習及び試験	自習及び試験



## アクシデントマネジメントにおける課題

- **教育・訓練のスパイラルアップ**

事象進展、事故収束に関する対応能力向上を図るための教育・訓練の実施計画を策定すると共に、要員のレベルの維持、向上を図り、その有効性、理解度を定期的に確認。

- **関連標準とのリンク**

各発電所の手順書等で要件を具体化するためには、本標準における基本的な技術要件に基づいて、今後制定される予定の機械学会の関連標準(SA対策設備設計ガイドライン等)、外的事象PRA、SA解析コードのV&V関連の各標準等を参考に展開する必要がある(現在、原子力学会では地震随伴の火災、溢水事象等のPRA手法を審議中)。

- **外部支援との連携**

シビアアクシデント時における可搬式機器、資機材の搬入については、プラント固有のリスク評価を行い、必要な時間裕度等の計画を策定すると共に、関連する外部機関と情報共有し、的確な連携体制を確立。

## 今後のスケジュール

- スケジュール

システム安全専門部会(5/31)の書面投票で承認され、現在、標準委員会の書面投票の審議を実施中。その後はパブコメを経てH25年12月の制定を目指す。

タイムスケジュール	H23.12	H24.11	H25.6	H25.12
主要工程(部会、標準委)	分科会設置 ▽	中間報告 ▽	最終報告 ▽	制定 ▽
関連文献の調査・分析	[Yellow bar from H23.12 to early H24.1]			
標準作成のための検討	[Yellow bar from early H24.1 to mid H24.1]			
骨子の作成	[Yellow bar from mid H24.1 to early H25.1]			
原案の作成、レビュー、審議	[Yellow bar from early H25.1 to H25.6]			
書面投票、パブコメ、制定	[Yellow bar from H25.6 to H25.12]			