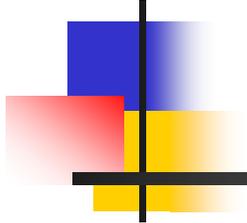


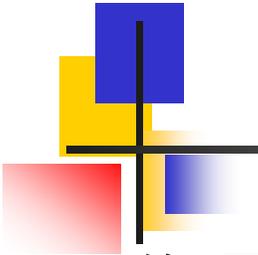
2013年春の年会
標準委員会セッション2(システム安全専門部会)

「福島事故に鑑みた原子力安全の
総合的・一体的向上と規格基準」



(1) SAM実施基準の検討の現状と課題

平成25年3月28日
東京大学大学院 工学系研究科
岡本 孝司

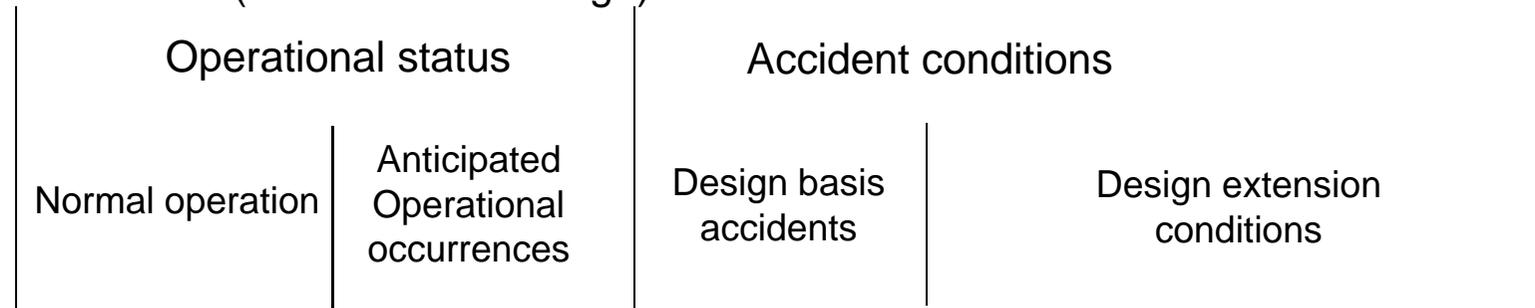


深層防護から見た福島事故

- 第3層(設計基準事象)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(AM)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。
- AM改善の重要な視点
 - 福島第一発電所事故の反省を踏まえ、設計想定事象を超えた場合のAMにおいて事象の想定、対策及び教育・訓練が不十分であった。
 - AMは従来の設計の延長ではない。すなわち第3層迄の想定された基準事象や基準シナリオを予め設定して設計対応することでは不十分であり、第3層とは独立した効果(Independent Effectiveness)を確立し、運転・保守を中心とした柔軟なマネジメントで対応することが重要である。

深層防護とアクシデントマネジメントの関係

Plant states (considered in design)



既設炉に対する設計対応

アクシデントマネジメント

原子力安全委員会指針類
安全設計審査指針他

内部事象: 単一故障
外部事象: 地震、津波他

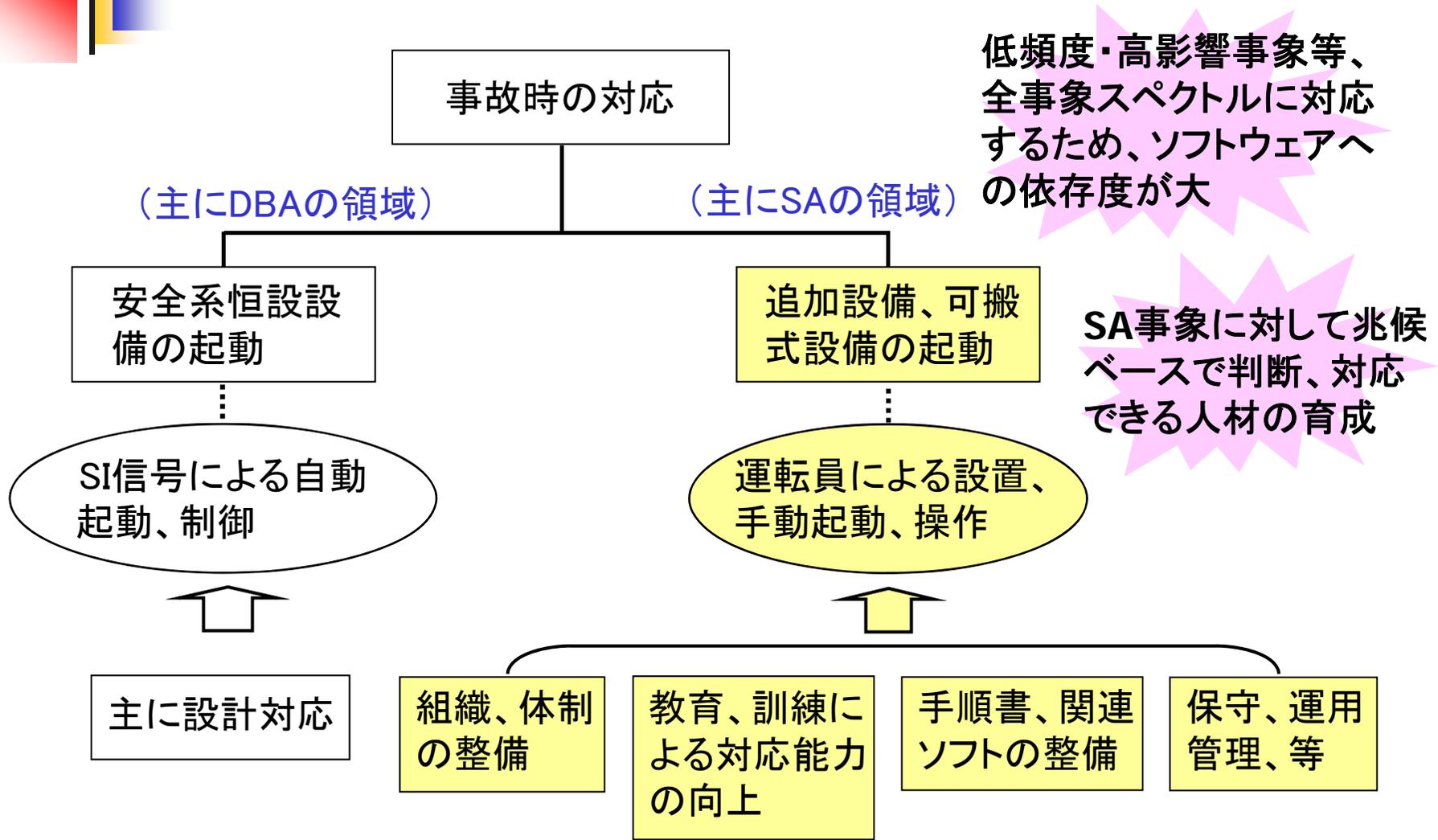
安全を担保する最も重要な部分

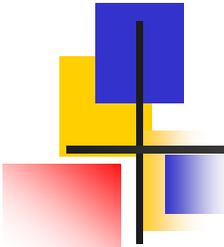
1992 原安委報告書
(2011改訂)

福島第二: 成功
福島第一: 失敗(不十分)

設計で担保した後の
マネジメントの充実

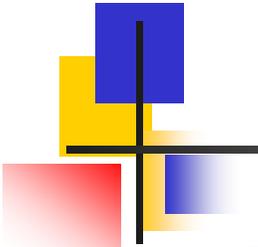
アクシデントマネジメントの特徴





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、内的事象と外的事象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策の準備が必要。
- 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。

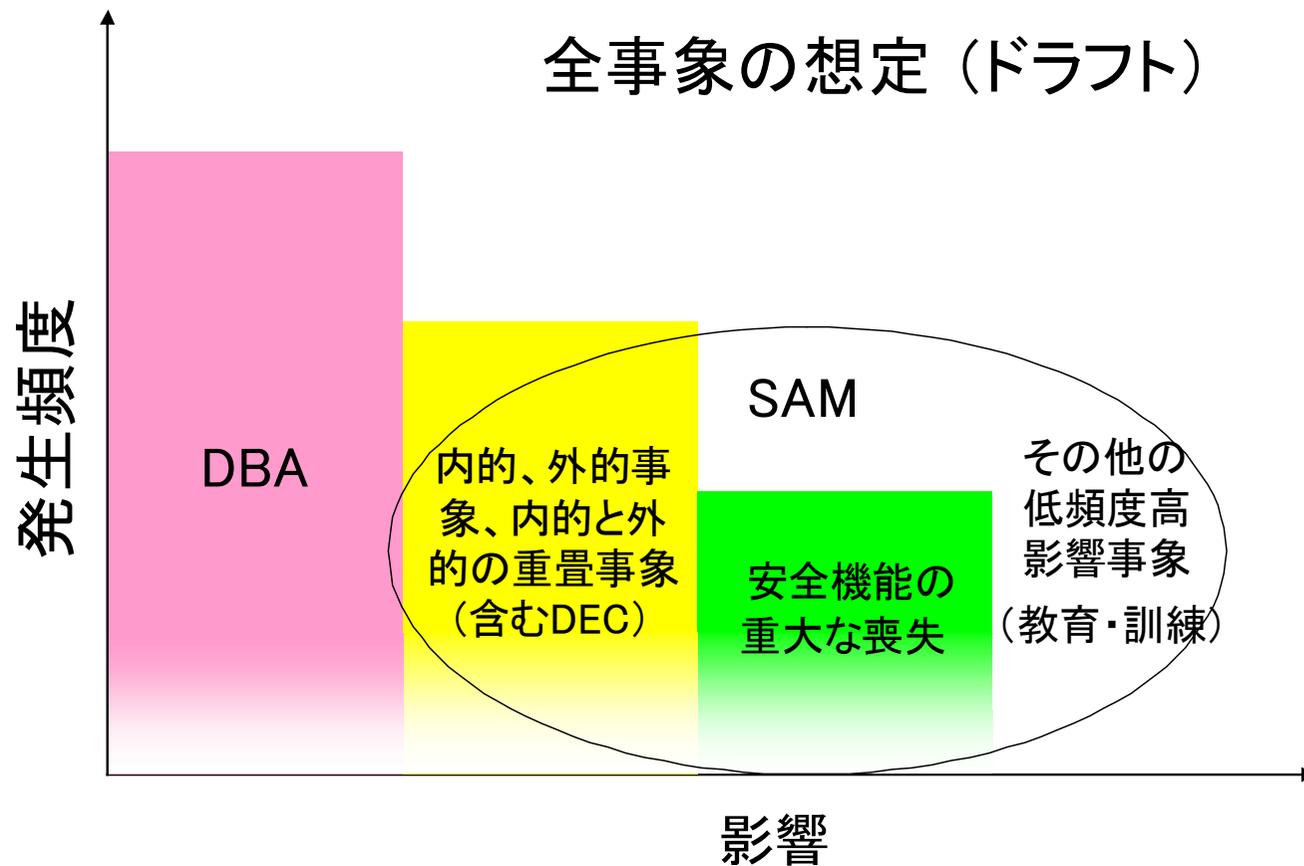


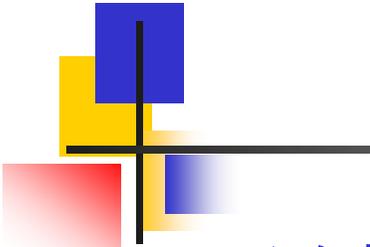
SAM実施基準策定に向けた改善の視点

- **既設炉に特化**
既設炉の安全性向上が緊急課題であり、安全性を確保するために要求事項を検討。
- **継続的改善**
PDCAサイクルをベースとしたAM策定とし、継続的改善を行うことでSAM実施基準の陳腐化を回避し、安全性向上のスパイラルアップを図る。
- **事象範囲と対策系の考え方**
リスクを指標として、①内的、外的事象、内的・外的事象の重畳事象(シナリオで予測し得る事象)、②安全機能の重大な喪失(シナリオでの予測が困難な事象)、③その他の低頻度・高影響事象の3カテゴリーに分類して影響を評価。
①については、マニュアルを整備し、ハード、ソフト両面で対策を実施。
②については、主にソフトで対策し、可搬式機器等のハード対応も併用。
③については、ソフトで対策し、教育・訓練の一環としてブレインストーミング等で危機意識の啓蒙、対応能力の向上を図る。

SAM実施基準策定に向けた改善の視点

事象のカテゴリー(SAMの範囲)





SAM実施基準策定に向けた改善の視点

- **リスクを考慮した対策**

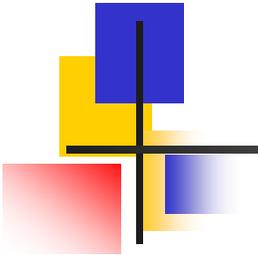
設備の脆弱性特定のための事故シナリオの抽出評価にあたっては、PRAだけでなく、定量化が困難な場合にもストレステスト等の定性評価や専門家による工学的判断も活用して、説明性を担保する。評価では、設計だけでなく運転・保守を含めた総合的なリスクを考慮する。

- **マネジメントクラス**

ハードウェアだけでなく、ソフトウェアについてもリスクを考慮したクラス分類を実施。クラス分類にあたっては、従来の設計(MS、PS)と異なるマネジメントクラスを設定し、可搬式機器の運用及び保守管理、教育・訓練の頻度、計画等に反映させる。

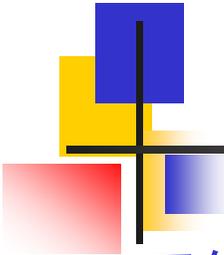
- **教育・訓練の充実、具体化**

プラントの事象進展、事故収束に関する知識向上を図ると共に有効性評価を行う。また、低頻度・高影響事象等に対する対応策の討論を通して、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

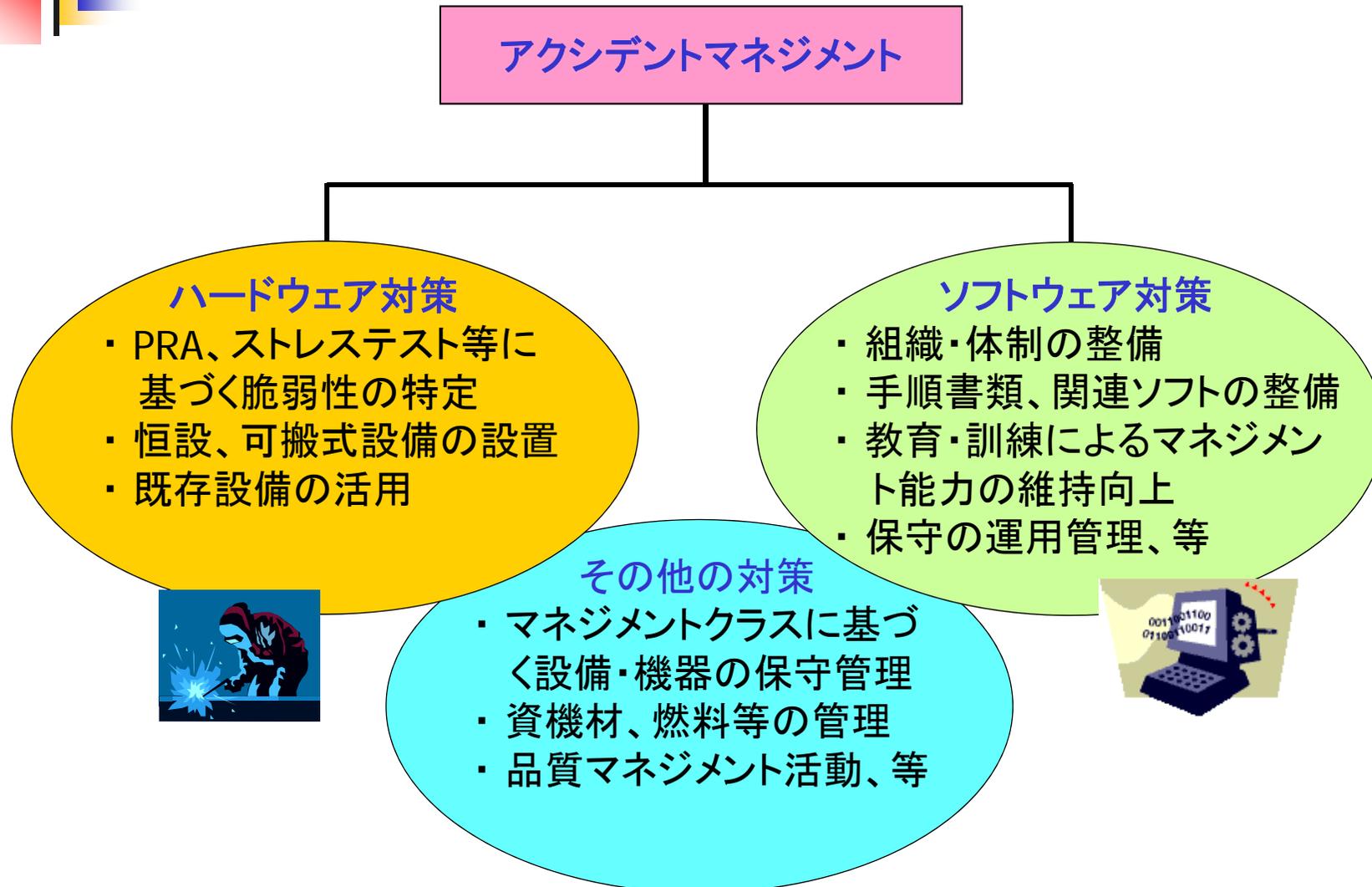
- 設計基準事象を超え、炉心及び使用済燃料プール内の燃料が大きく損傷する事象に対して、起因するリスクを適切に評価、把握した上でシビアアクシデントに至る可能性を低減し、またシビアアクシデントに至った場合でもその影響を緩和するためにハードウェア、ソフトウェアを活用したマネジメントを実施する。シビアアクシデントの事象進展の各段階における具体的な目的は下記の通り。
 - シビアアクシデントの防止
 - 事故進展の抑制
 - 格納容器の健全性確保
 - 放射性物質の放出の最小化
 - 長期安定冷却状態



アクシデントマネジメント整備の基本的な考え方

- **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

発電所脆弱性の特定

発電所対応能力の同定

AM対応方策の検討

設備改造または追加

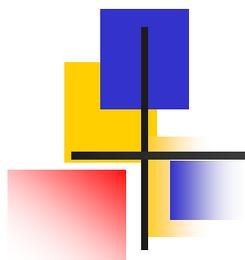
手順書類の作成

緊急時対応組織の整備

教育・訓練

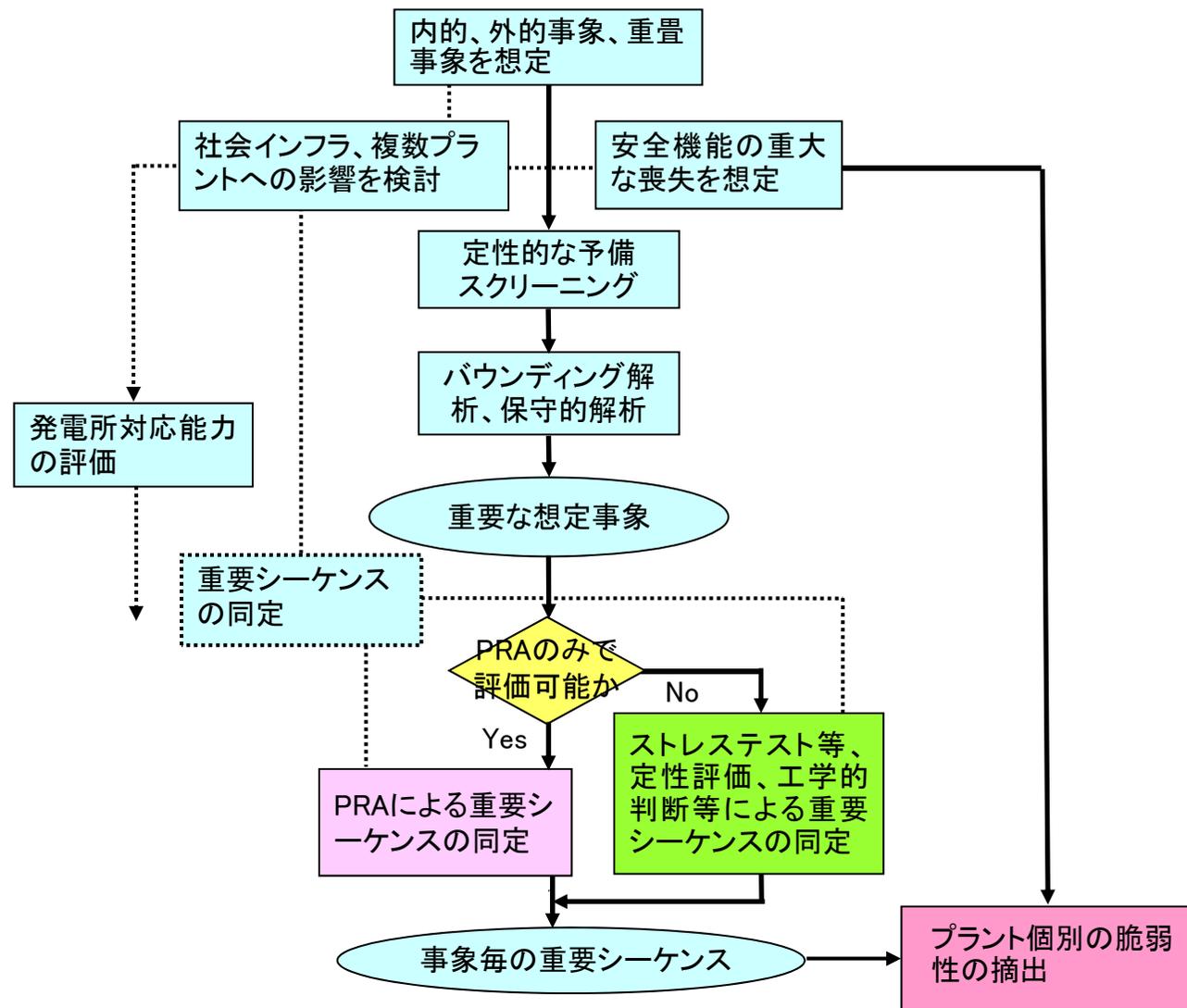
確認及び検証

AMの維持向上

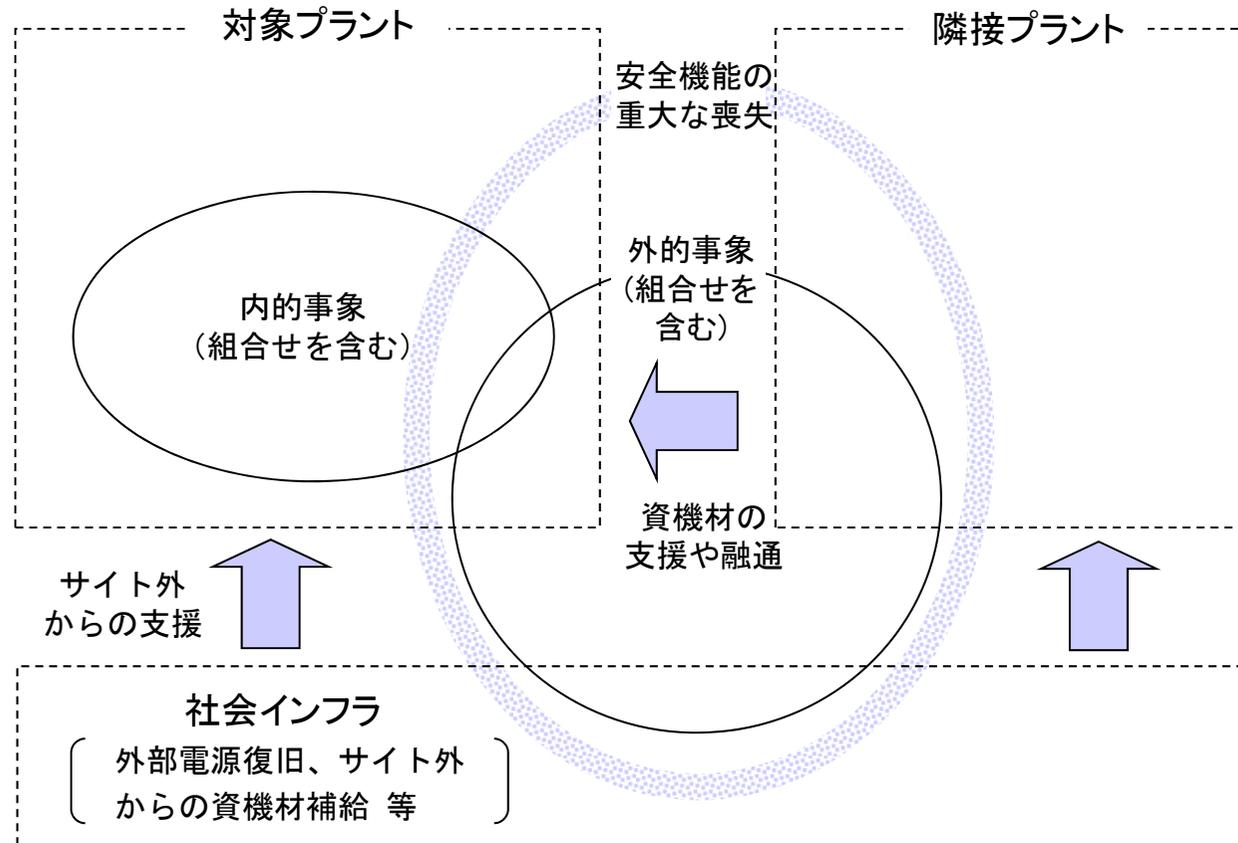


SAM実施基準のポイント

発電所脆弱性の特定(脆弱性抽出ロジック)



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(低頻度・高影響事象も含む)、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 (Loss of Large Area: LOLA) も想定。
- 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。

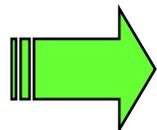
内部ハザード	外部ハザード	
	自然ハザード	人為ハザード
内部火災 内部溢水 内部ミスイル 内部爆発 重量物落下 化学物質放出、等	地震、津波 外部火災 火山噴火 隕石落下 強風、竜巻 生物学的現象、等	オフサイトでの爆発 オフサイトでの有毒物質放出 航空機落下、衝突 等

PRAによる重要シーケンスの同定(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 重要シーケンスグループの特定及び脆弱性の抽出
事故シーケンスグループの発生頻度、全CDFに占める寄与度から重要なシーケンスグループを抽出

10⁻⁶/炉年の導出根拠

- ・原安委専門部会の安全目標
CDF(全リスク) < 10⁻⁴/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



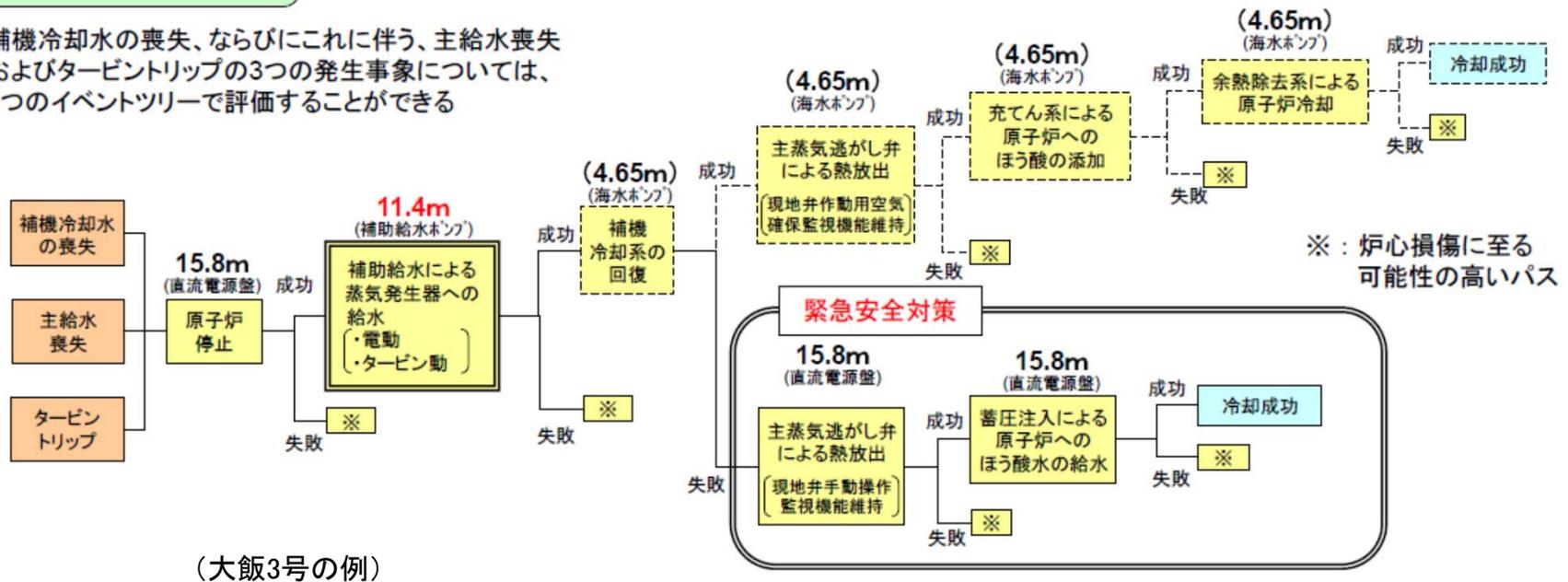
重要シーケンスの判断基準(案)

- ・「CDF ≥ 10⁻⁶/炉年」 或いは 「CDF ≥ 全CDFの20% かつ CDF ≥ 10⁻⁷/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

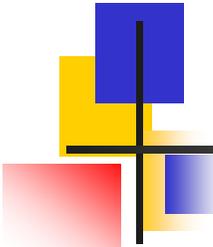
ストレステストによるプラント脆弱性の同定例

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)。

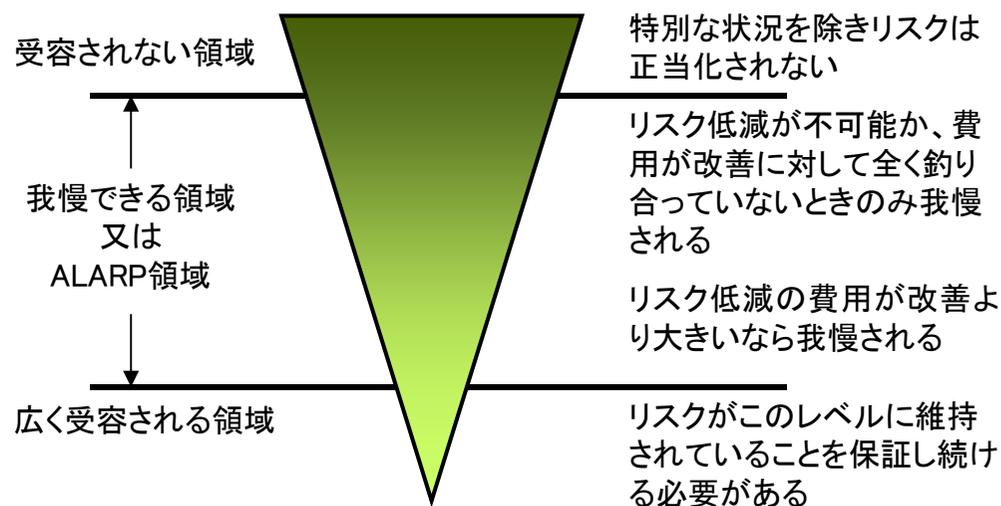


リスクに基づくSAM方策の考慮要件

- アクシデントマネジメントの考慮要件
 - プラントの脆弱点に対して、合理的かつ実行可能な範囲で設備の改造又は追加を考慮。
 - 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。
 - AMの有効性が損なわれないように設置、保管場所を考慮
 - 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策の体系的評価
 - 対策実施による影響、外的事象及びプラント共用部からの悪影響伝播、時間的制約における不確定性等を考慮して体系的評価を実施。
- アクシデントマネジメント策の有効性確認
 - 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SAM方策の考慮要件

- 合理的で実行可能なAM策の考え方
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**の考え方に基づき、安全重要度の高いハードウェア、ソフトウェアを重点的かつ確実に活用する。

- 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、リスク影響度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分類

■ マネジメントクラス分類による対策例

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対応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、AM策の影響度に応じてマネジメントのクラス分類を実施。
【マネジメントクラスの設定例(暫定)】(要求案については現在検討中)

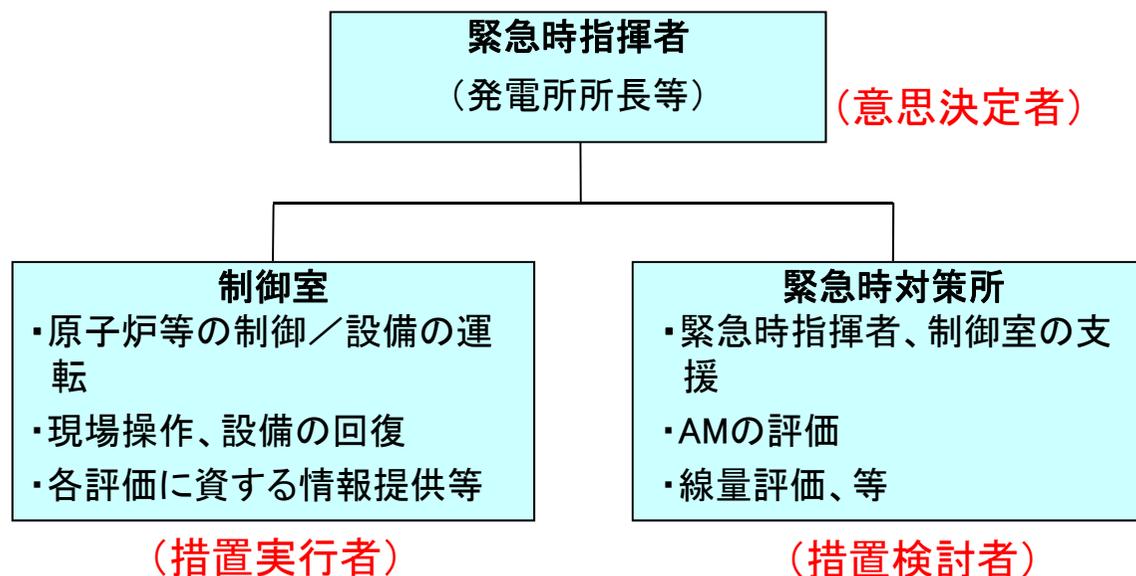
クラス	定義	BWR AM策例
マネジメントクラス-1	重大なリスクに影響を与えるAM策(外的事象のリスクの寄与大)	代替反応度制御、電源車、消防車耐圧強化ベント、これらに関する教育・訓練、等
マネジメントクラス-2	考慮すべきリスクに影響を与えるAM策(内的事象のリスクの寄与)	手動スクラム、F&B、CVスプレイ手動、電源融通、これらに関する教育・訓練、等
マネジメントクラス-3	検討しておくべきリスクに影響を与えるAM策(上記クラス以外)	DW冷却系、原子炉冷却材浄化系による代替注水、外電復旧、これらに関する教育・訓練、等

- ・耐震性、耐環境性、操作性、移動性等に基づき上記クラス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

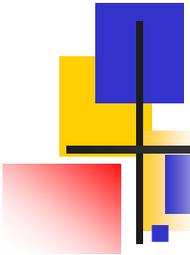
SAMの実施体制

■ 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



SAM方策例(教育・訓練の考え方)

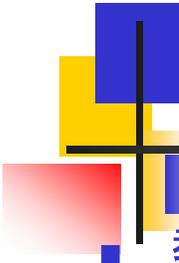
- 運転員・保守員をはじめとする全所員の経験と行動品質の向上を図ることでマネジメント能力を向上させる。また、SATの原則に則り、役割に応じたマネジメント能力を保証すると共に、継続的に改善を図る。各対象者に必要な能力は下記の通り。
 - 意思決定者
専門知識の他、発電所全体を俯瞰し、リスクを判断する能力、SAの総合知識、措置検討者グループとの緊密な連携能力、
 - 措置検討者
プラント状態の伝達、機器・システム、SA及びAMに関する専門知識
 - 措置実行者
プラント状態の把握、必要な機器、システムの作動方法の知識
- 上記の役割に応じた必要な能力を有する要員アサインの確認、定期的な訓練の実施と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。
- 役割及び各要員の能力維持のために机上訓練、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) AM 策の立案	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 AM 策を選択し、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) AM 策の実施	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 AM 策を実施
(d) AM 策の監視と更新	運転員の実施した AM 策の有効性を監視
	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

SAM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



SAM実施における今後の課題(留意点)

■ 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。

■ 総合的なリスクを考慮した対策の実施

マネジメントの策定に当たっては、PRA、ストレステスト及び工学的判断を活用し、対策実施による運転、保守等への悪影響の有無も含め総合的なリスク低減を評価。

■ 外的事象PRA手法の積極的な取り込み

各発電所で想定される外的ハザードの抽出を行う際には、最新の国内外の外的事象に関する技術的知見を積極的に反映(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)。

■ 防災活動とのインタフェースの確立

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、防災に係わ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
 今後、基準案の審議、パブコメを経てH25.12に制定する予定
 (SA規制要求の審議状況を注視しながら、マネジメント主体の
 標準としてブラッシュアップ)

タイムスケジュール	H23.12	H24.11	H25.6	H25.12
主要工程	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 H24.11]			
標準作成のための検討	[Yellow bar from early H24.11 to mid H24.11]			
骨子の作成	[Yellow bar from mid H24.11 to early H25.6]			
原案の作成、レビュー	[Yellow bar from early H25.6 to mid H25.6]			
パブコメ、制定	[White bar from mid H25.6 to H25.12]			