

# 7章 事故で明らかになった課題

## 7.1 深層防護の観点からの課題の整理

## 7.2 安全設計に関する課題

## 7.3 安全管理に関する課題

守屋公三明 (日立GE)

# 7.1 深層防護の観点からの課題の整理

## 7.1.1 これまでの安全確保と深層防護の関係

- 安全は、適切な安全設計と適切な安全管理(マネジメント)によって担保
- 深層防護の思想に基づいて五層の防護レベルを設定
  - 第1のレベル:異常や故障等のトラブルの発生の防止
  - 第2のレベル:トラブルが起きた場合にそれを直ちに検知して対応することにより、事故への発展の防止
  - 第3のレベル:万一の事故に対する影響の緩和
  - 第4のレベル:安全設計の想定を超えて原子炉の炉心が損傷するようなシビアアクシデントの防止と影響の緩和
  - 第5のレベル:安全設計の想定を超えて原子炉の炉心が損傷するようなシビアアクシデントの防止と影響の緩和の敷地外対応
- 深層防護に基づく設計は、機器の多重故障に対してはPSAによりその妥当性を確認

## 7.1.2 福島事故で見られた問題

- 自然災害に対する深層防護設計の質の違い
  - 自然災害に対する深層防護の第一レベル及び第二レベルは、機器故障ではなく、耐震設計、防潮堤など外的災害からの防護
  - 第一、二レベルが突破されると、共通原因でプラント設備の多くが機能不全
- 自然災害に対する防護レベルの設定の難しさ
  - 歴史的な経験データに基づく設定の難しさ(低頻度で想定を超える可能性)
  - 地震に伴う津波のような複合的な被害の想定難しさ
  - 想定を超えた場合のプラントへの被害の程度、範囲の想定難しさ
- シビアアクシデント(第四、五レベルでの)の実行上の困難さ
  - 共通原因故障を誘発するために、AMの対応が複合的
  - サイト全体が被災することによるアクセスやコミュニケーションの困難



■ 発生頻度は低いが大きな被害を及ぼす自然災害に対して適切な深層防護設計とは何か？

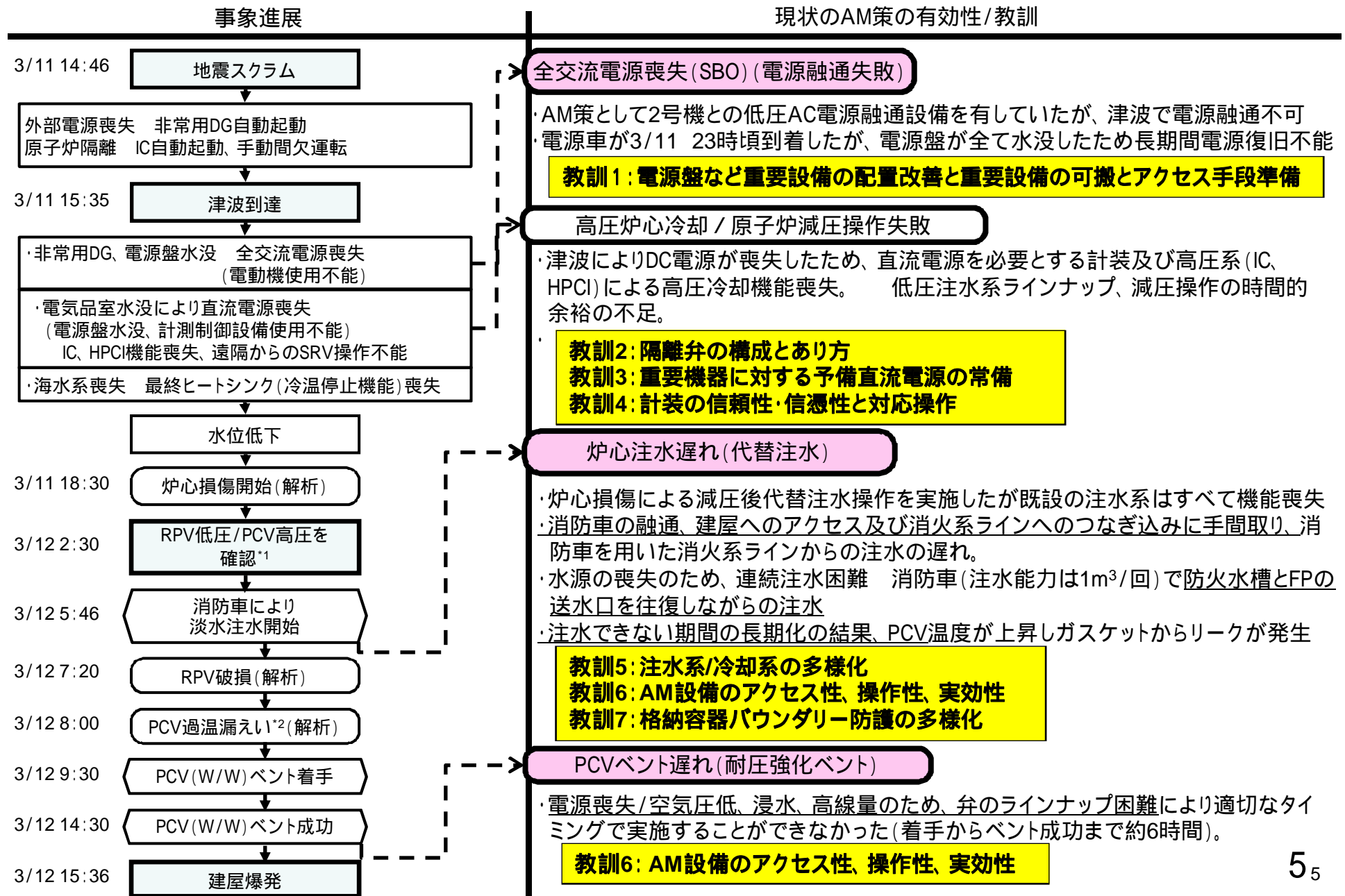
- 深い「クリフ・エッジ」に対して Safety Netの準備(頻度は低くても被害が大きな事態への緩和策)

## 7.2 安全設計に関する課題

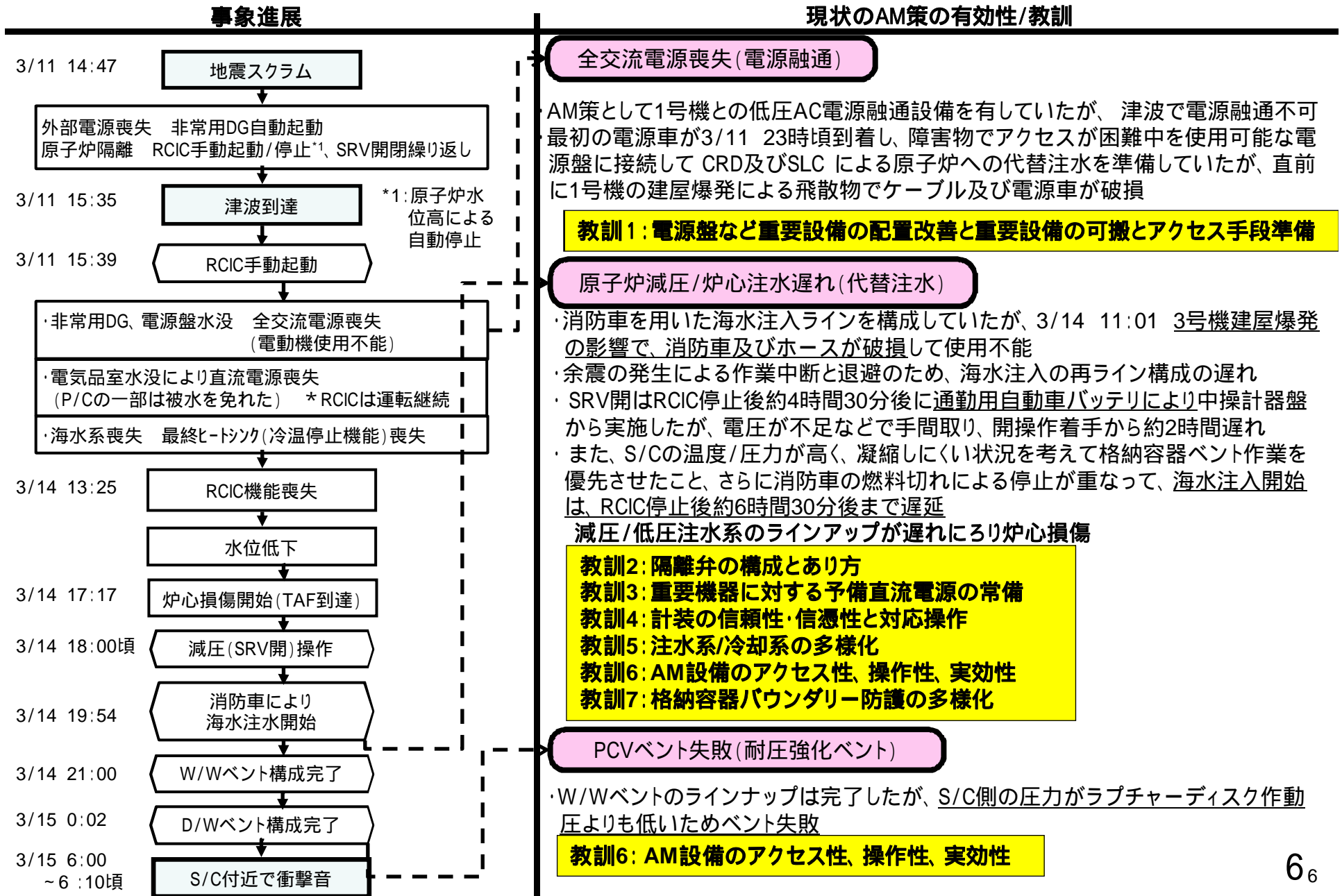
- 設計を超える過酷事故のリスクを認識してAM(アクシデント・マネジメント)を整備していたが、福島ではその想定を超えた事態を経験
  - 想定を超える事態(想定外)に対する安全確保の考え方が重要
  - 事態に応じて的確な判断と指示、実行をする体制と教育、訓練が重要
- 特に、福島事故のようなサイト全体に被害が及ぶような事態には、プラントの設備対策とAMでは限界
  - オンサイト、オフサイトを含めた多重、多段の安全確保の考え方が必要
  - 「誰が何時までに何をするのか」を平時より明確にして「備え」を怠らないことが重要
- AM設備も想定外の事態において不十分な働き
  - 様々な場面に対して実行性、操作性のあるAM設備が重要
  - 初動を的確に実行するためには、計測の信憑性が重要

# 7.2.1 事象進展と得られた教訓

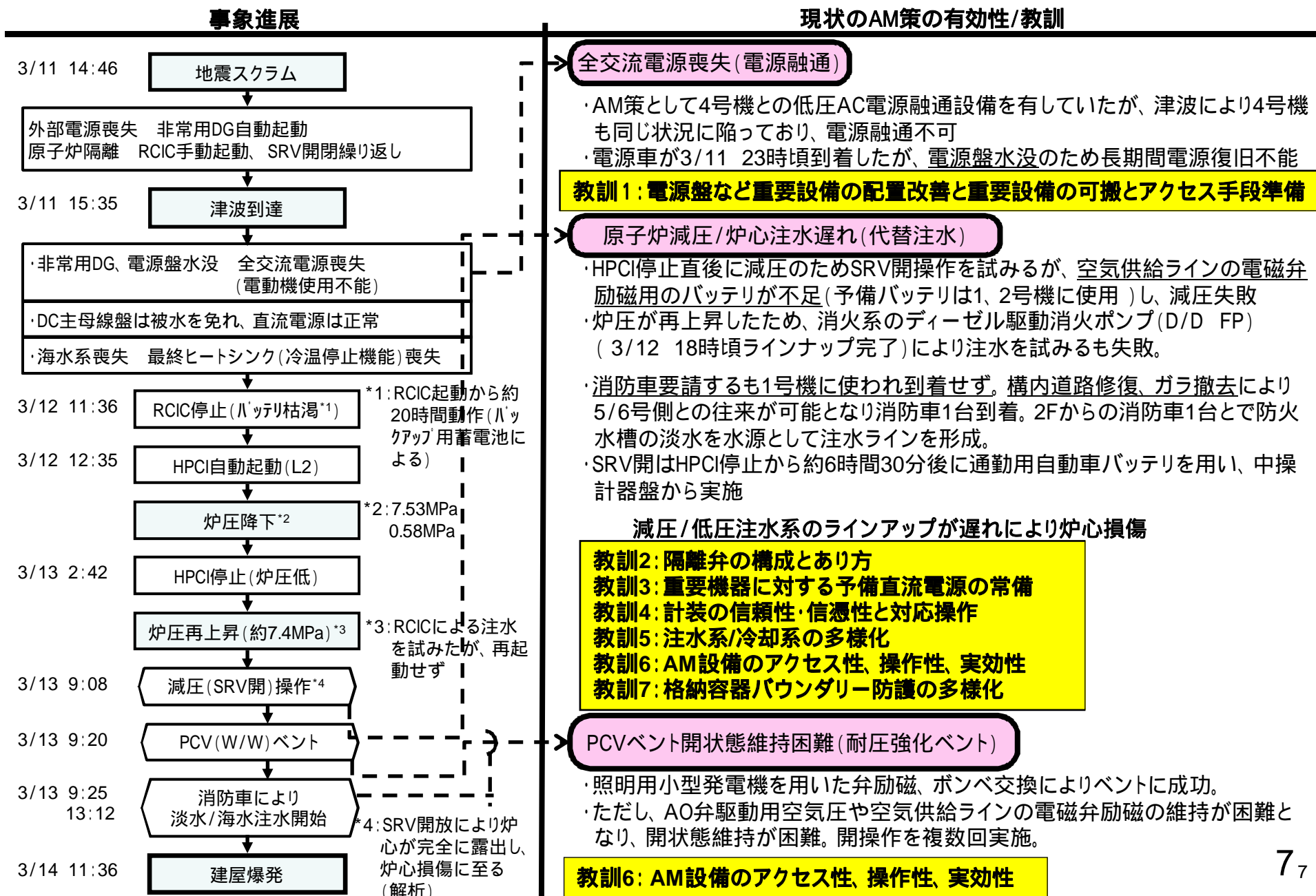
## (1) 1号機の事象進展と教訓



## (2) 2号機の事象進展と教訓



### (3) 3号機の事象進展と教訓



# 教訓1：電源設備など重要設備の配置改善と重要設備の可搬と緊急時のアクセス手段

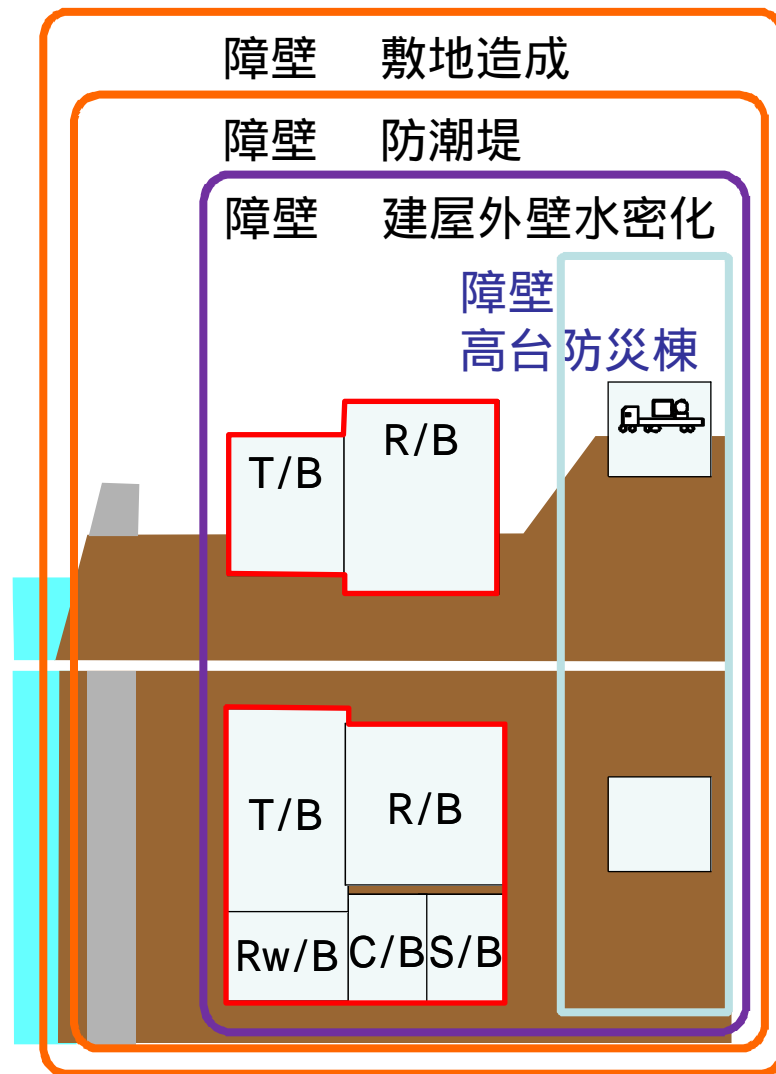
- 津波に対しては、可能な限り高位置に重要機器を配置すること及び水密化は有効
- しかし、給排気口の存在や過大な水撃力により完全な防御は困難



給排気口や扉、貫通口などから浸水の可能性



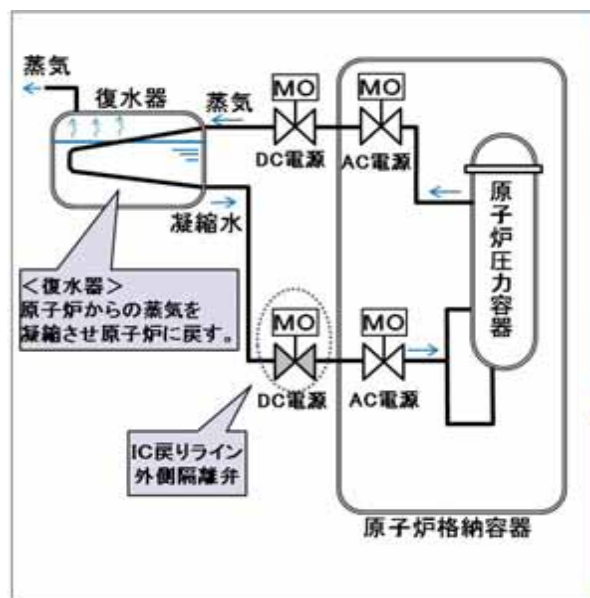
- 想定高さを超えた津波やその他の外部リスクに対しては、別の場所からの可搬もしくは仮設による復旧対策が必要
- 電源車、電源盤、注水系などの高台や防災棟(完全水密建屋など)に常備
- 緊急時のアクセスのために、緊急取り付け口の確保とアクセスルート作成のための重機の常備



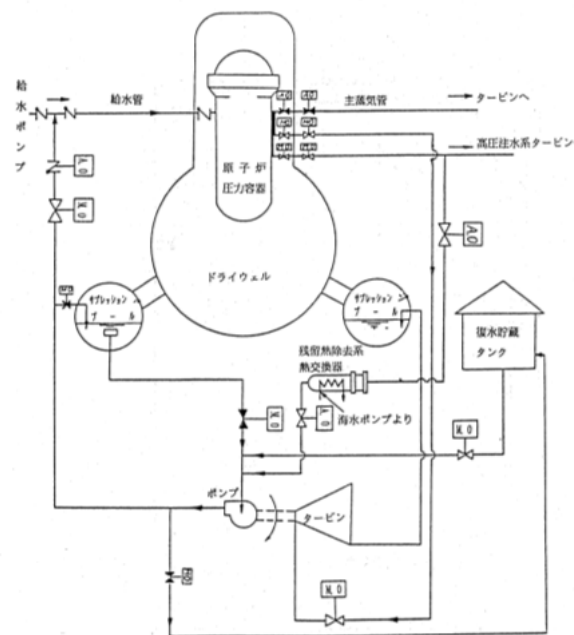


## 教訓2: 隔離弁構成のあり方

- 非常用復水器 (IC) あるいは原子炉隔離時冷却系 (RCIC) は原子炉隔離時の冷却設備として設置されており、機能喪失の場合でも HPCI や原子炉減圧から低圧注水系に役割を移行することが現行の設計 系統内で破断を検知した場合 (検知不能の場合も含む) は、隔離を優先させているため、1号機では DC 電源喪失から検知不能となり隔離信号が発生し、維持されていた AC 電源により隔離弁が動作し IC が機能喪失した可能性
- 隔離弁の動作に関しては、過酷事故 (SA) まで考えて隔離よりも機能優先の考え方もあるかもしれないが、設計基準事故時のバウンダリー機能確保や SA 時にも隔離が必要な事態も想定 隔離優先を基本としつつ、必要な場合は隔離弁を手動もしくは遠隔で開ができる手段 (隔離弁の格納容器外側設置、予備の直流電源の常備) を追加



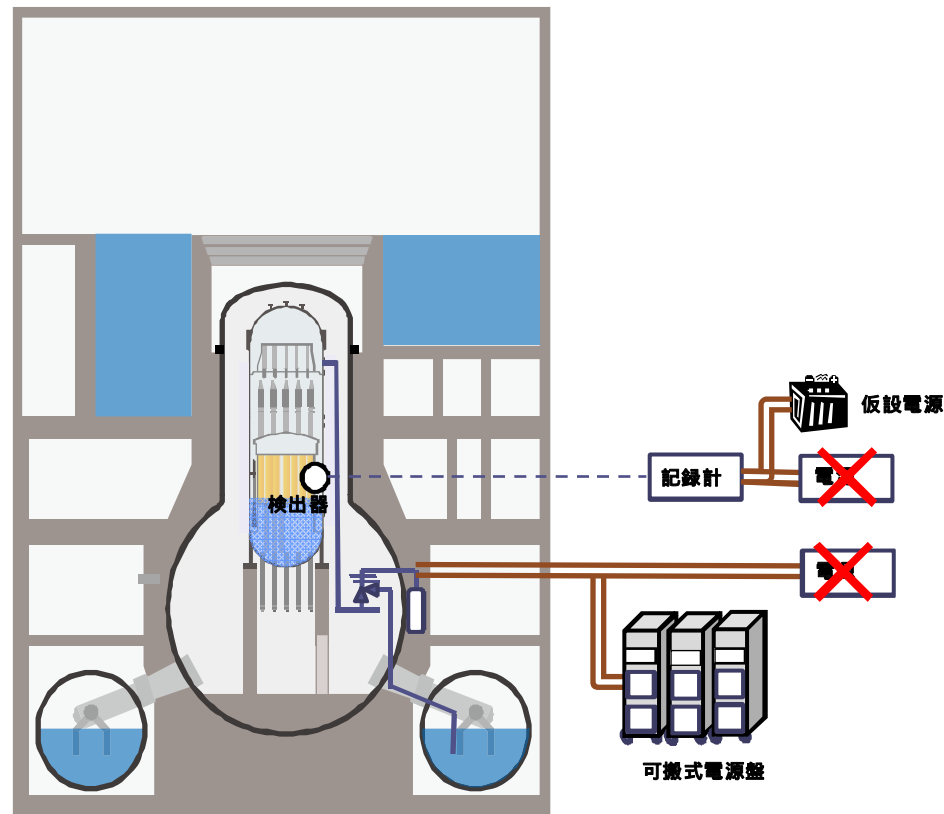
ICの隔離弁構成



RCICの隔離弁構成

# 教訓3：重要機器の予備直流電源の常備

- DC電源の喪失あるいは枯渇によって、以下の問題が発生
    - 計装の機能喪失により状態の把握が困難
    - SRVによる減圧が遅延
    - RCIC、HPCIなどの注水系の起動信号の喪失
- 可搬のDC電源もしくは予備DC電源を準備



## 教訓4：計装の信頼性/信憑性と対応操作

### ■原子炉水位、圧力、温度などのAM実施上必要な計装の信頼性/信憑性が重要

- 計測器の適用レンジの拡大と環境条件の見直し 設計条件での精度とSA時の精度要求の違いを考慮

### ■信憑性を確認する別の手段を確保することは重要

- 嘘をついている計測器を見抜くことの難しさ 棄却の判断ができるだけでも十分

### ■信憑性が無いと判断した場合のAM手順と訓練が重要

- 計測不能な状態でのAM手段を充実

## 教訓5：注水系/冷却系の多様化

- 水密強化やプラント配置の対策は重要だが、設備設計の条件を超えた「想定外」での機能喪失も考慮
  - プラント外からの救援/支援も含めた多様化
  
- 水源まで含めて機能維持の達成も考慮
  - サイト内、サイト外からの水の融通を含めた水源の多様化
  
- 常設の設備も設計想定を超えると機能喪失の可能性も考慮
  - 常設の設備だけではなく仮設の設備も含めた多様化
  
- 想定外の事態でも対応することも考慮
  - 多様なシナリオに対応できるようなAM設備と手順
  - 想定外の場合でも炉心注水、格納容器注水を実行できるような柔軟性のあるAM設備と手順

## 教訓6 : AM設備のアクセス性、操作性、実行性

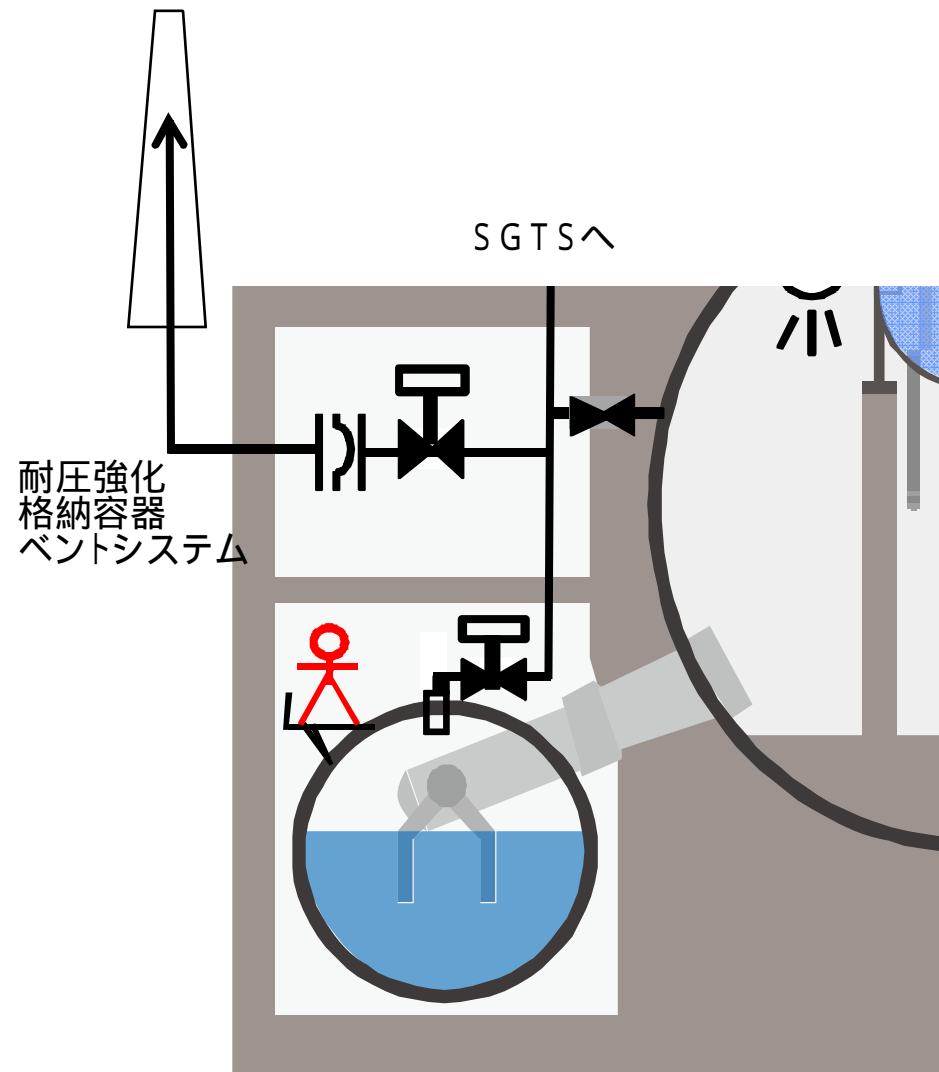
### WWベント弁のアクセス性とラプチャーディスクの問題

#### アクセス性と操作性の問題事例

- ・WWベント弁がバウンダリー近傍に設置していたために、手動開実施する上でアクセスと操作に困難
- ・外部から注水実施時に繋ぎこみ先へのアクセスが困難
- ・外部から注水のバイパスがあり、炉心への有効な注水に遅れが発生

#### 実効性の問題事例

- ・ラプチャーディスクは誤操作によるバウンダリー機能喪失を防止するために設置していたが、タイムリーなWWベント実施の障害



# アクセス性, 操作性, 実行性の改善

## アクセス性の改善例

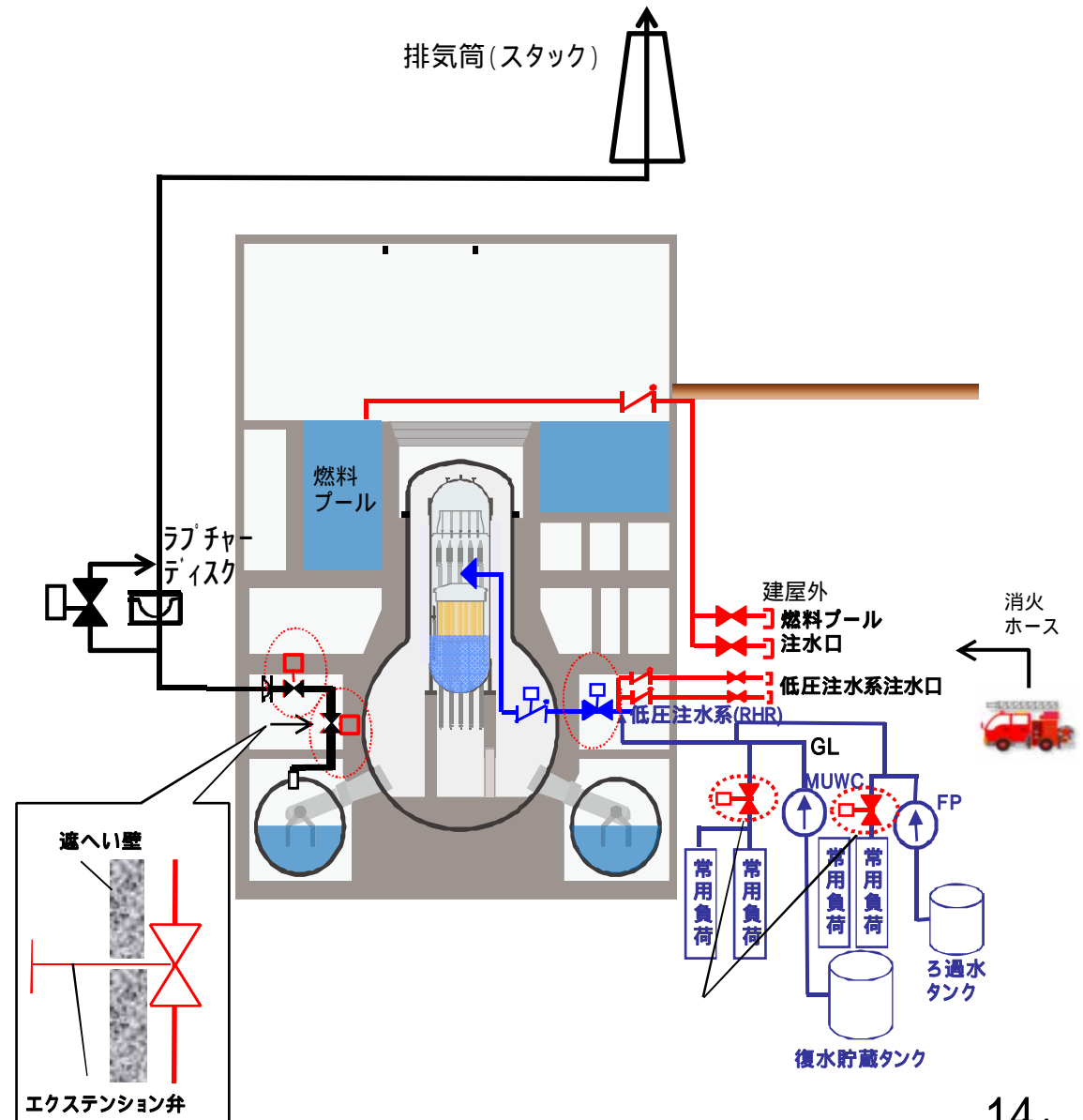
遠隔手動ハンドルを追加により, 操作時の被曝を低減  
代替注水の注水口の分散配置により, 容易に接続可能な構成

## 操作性の改善例

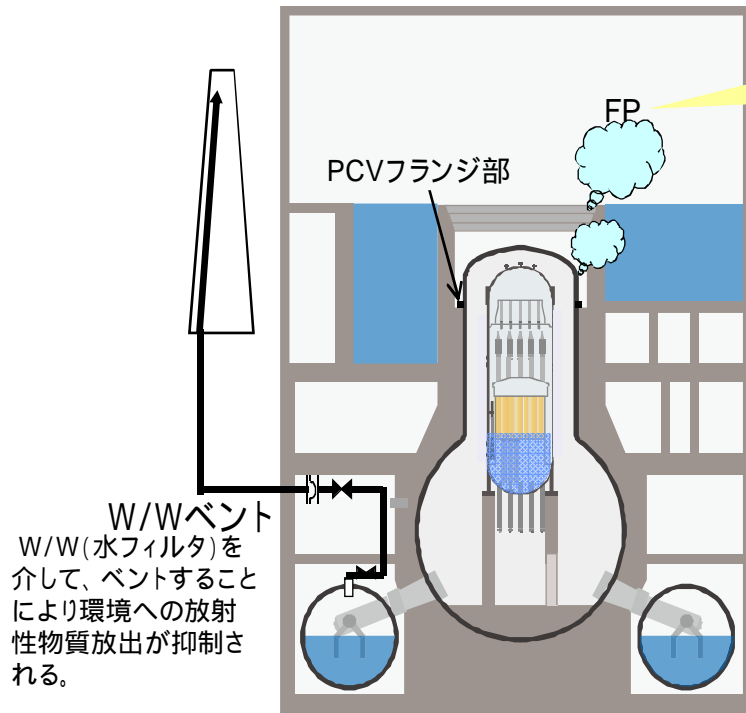
常用負荷への隔離弁追設により, 容易にバイパス対策可能な構成  
燃料プールへの代替注水専用ライン追設により, 容易に注水可能な構成

## 実行性の改善例

ラプチャーディスクをバイパス可能な構成もしくはラプチャーディスクの削除



# 教訓7：格納容器バウンダリー防護の多様化

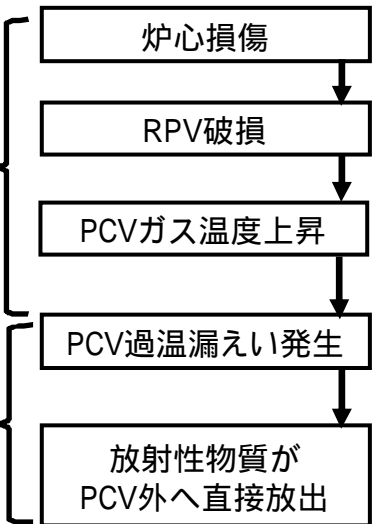


PCVフランジ部等の過温漏えいにより放射性物質が直接放出

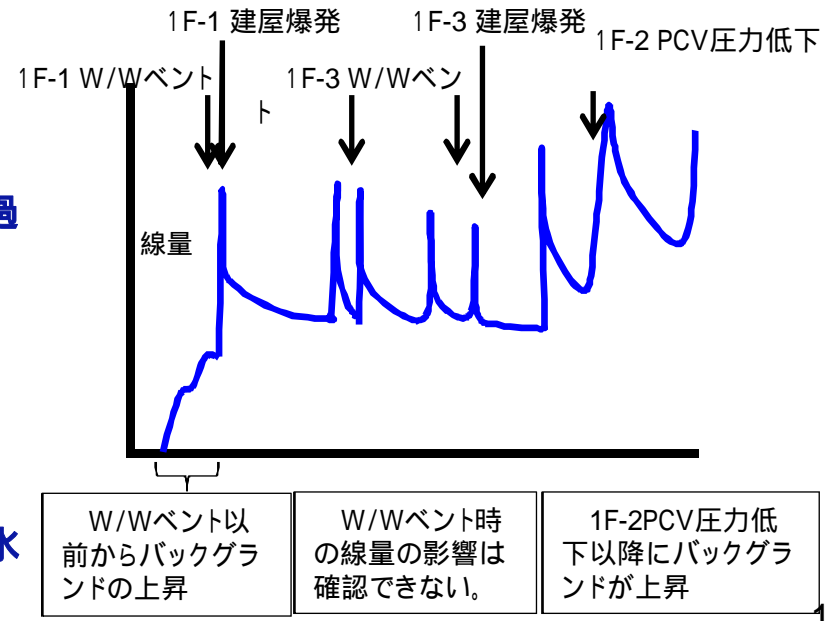
炉心注水遅れ

PCVベント遅れ

## 事象進展



- **福島事故での土壌汚染の推定原因**
  - 代替注水遅れ及びPCVベント遅れにより、ベント前にPCV過温リークが発生したことが土壌汚染の主要因
  - W/Wベントによる土壌汚染は少
- **対策**
  - 注水機能の強化により過温シーケンスを回避
  - 過圧シーケンスは、WWベントによりバウンダリー防護
  - さらに、非金属部の直接冷却(原子炉ウエルへの水張, 注水等)で過温シーケンスへの余裕向上

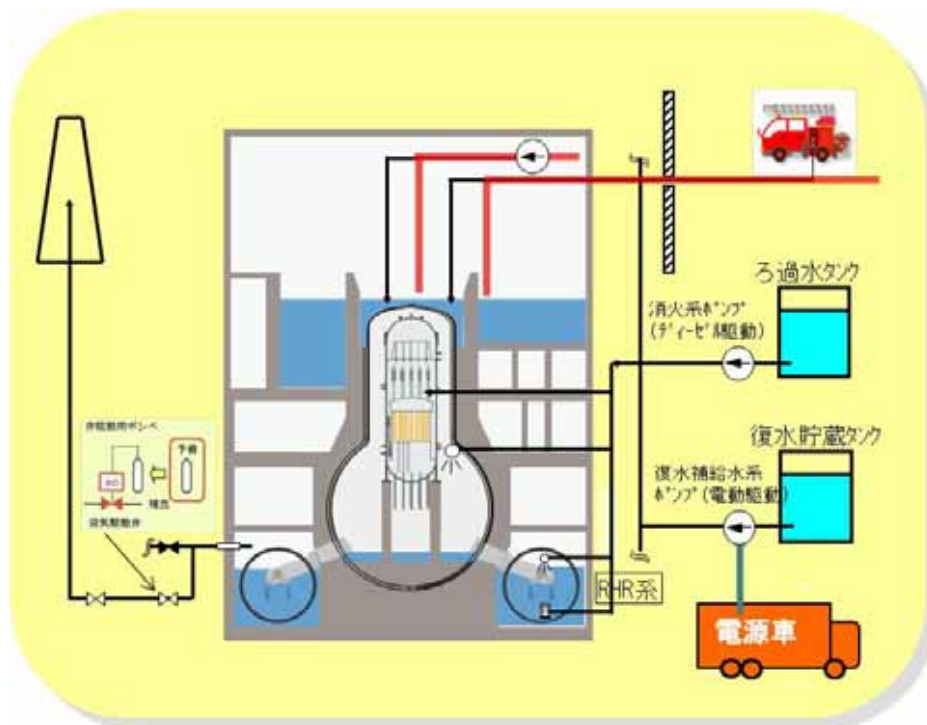


## 7.3. 安全管理の課題

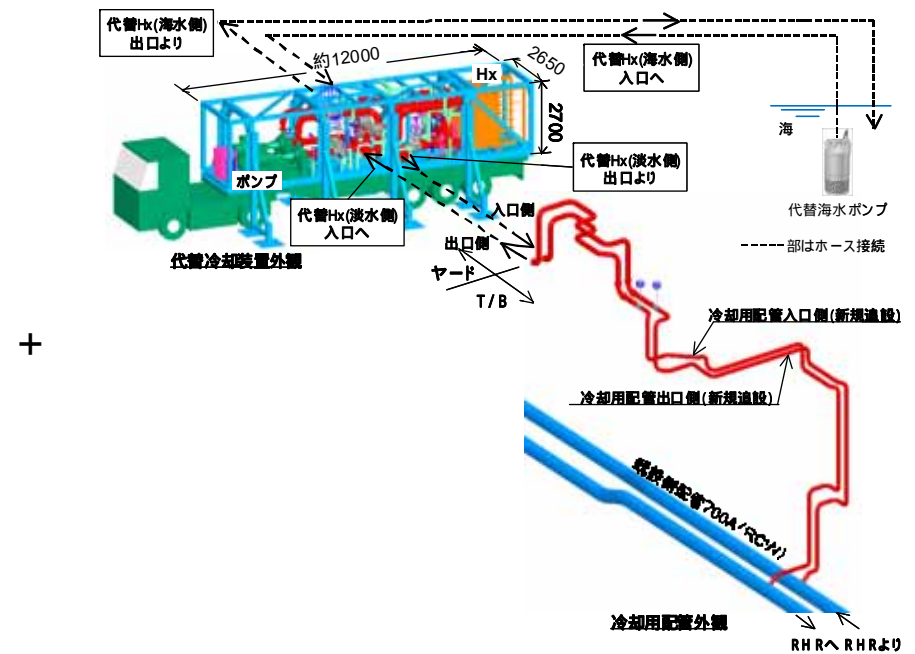
### 7.3.1. アクシデント・マネージメントの改善

- 設計基準事故を越えた事故に対しては、これまでのAMを実行性のあるものに改善することが重要
- 加えて、自然災害などの外的リスクに対してはプラント外からの救援を迅速に行う手順、体制が重要(プラント内、オンサイト、オフサイト各段階での多様なAM)

#### 既存AM設備と手順の改善



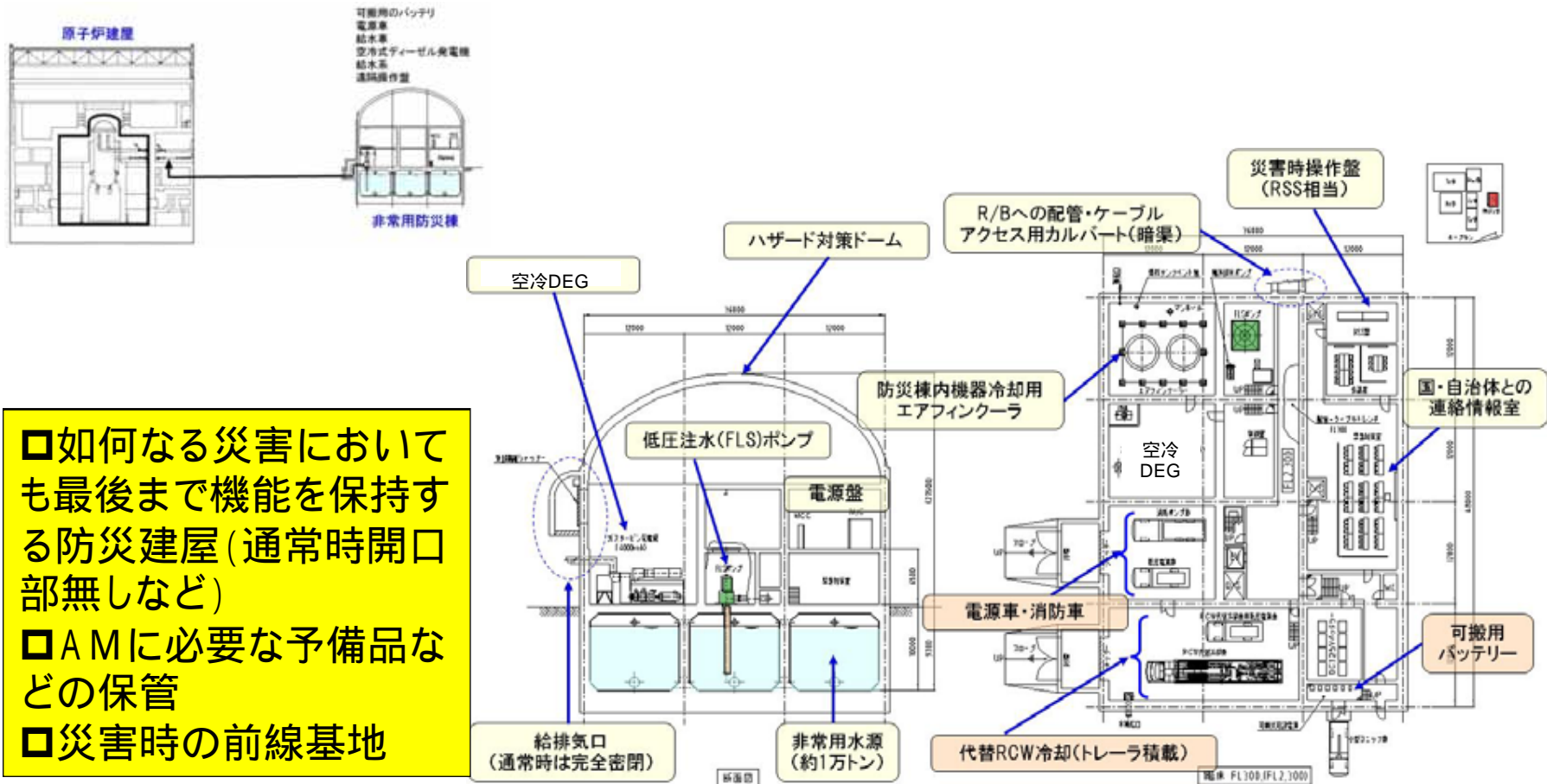
#### プラント外からの救援体制





# 中長期でのAMの改善案(例)

■現場のリスクと重荷を低減し、AMをより実行性のあるものに改善して行く努力が重要



- 如何なる災害においても最後まで機能を保持する防災建屋 (通常時開口部無しなど)
- AMに必要な予備品などの保管
- 災害時の前線基地

## 7.3.2 . 想定外も含めた安全確保の体制(案)

### (1) 事故のレベルに応じた多重、多様な安全確保体制

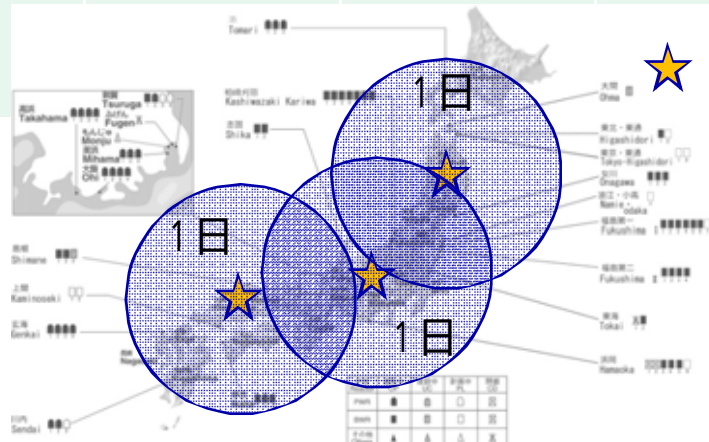
- 事故の発生防止～炉心損傷防止までは、個々の事業者による安全確保
  - 高い信頼性と裕度のある設備と運転・保守管理による事故発生防止と影響緩和
- 炉心損傷に至った場合、個々の事業者だけで事態を収束できなくなる可能性が高くなるため、事業者だけでなく行政も含めた多面的(機材、情報共有体制、連携活動訓練など)な安全確保体制

### (2) 緊急事態に備えた規制の整備

- AMに適した設備を速やかに導入できる規制体系
  - 想定外の事態に対しても柔軟な運用を前提とした規制
  - 迅速な導入ができる審査プロセス
- 緊急時と平時の適切な基準の使い分け
  - 従業員の被曝限度
  - 管理区域からの雨水の放出

# 安全確保のための戦略的展開の考え方(案)

プラント状態 対応状況	LEVEL1 (通常時)	LEVEL2 (過渡事象時)	LEVEL3 (DBA)	LEVEL4 (シビアアクシデント対応)	LEVEL5 (放射性物質の重大な放出の放射線影響の緩和)
対策	プラント安全設計			プラント内AM	炉心損傷 オンサイトAM オフサイトAM
設備	プラント常設			サイト内に常設	サイト外に常備
実施責任	運転員(中操)			オン/オフサイト緊急対策室	
対応主体 (実施体制)	電力事業者			電力事業者 + 行政	



## オフサイトセンター(例)

- 必要機材を共有し, 行政と事業者が連携しながら搬入(~1日)
- 事業者間、サイト間の連携支援

# 海外の教訓との比較

- 米国では福島事故の教訓として、プラント設備だけでなく、オンサイト、オフサイトからのマネジメントの必要性を認識
- 多様なマネジメントとして、産業界より可搬設備の準備、多様な配置や防護手段を提案

## 福島短期タスクフォース(NTTF)の勧告4.2「緩和戦略」対応

NRCは「福島第一原子力発電所の考察を踏まえた短期対策タスクフォース(NTTF)を公表し、設計基準上の想定を超える外的事象への緩和戦略(勧告4.2)について指示。

### <緩和戦略の要件>

本命令では、設計基準を超える外部事象を緩和するため、①初期段階(既存設備・リソース利用)、②過渡段階(サイト内に可搬式機器及び消耗品利用)、③最終段階(無期限に機能維持するためサイト外リソース利用)の3段階のアプローチを要求。主な要件は以下。

- ・ 設計基準を超える外部事象後の炉心、格納容器、SFP冷却を維持・回復するためのガイダンス及び戦略を作成、実施及び維持しなければならない。
- ・ 戦略はSBO及び最終ヒートシンク(UHS)喪失を緩和し、炉心冷却等の脅威に対応する十分な容量を有するものでなければならない。
- ・ 戦略の関連機器の外部事象からの適切な防護を行わなければならない。
- ・ 戦略をあらゆるモードにおいて実施できなければならない。
- ・ 完全な適合のため戦略に必要な機器の手順書等を含まなければならない。

### <産業界の対策:FLEX>

FLEXは、炉心冷却、閉じ込めの健全性、及び使用済燃料の冷却という主要な安全機能を果たすための戦略としてNEIが提案。NRCスタッフは命令の要件を満足できるものとしている。FLEXアプローチの概要は以下。

- ・ 原子炉の重要安全機能を支援する電力確保の多重手段に係る携帯ポンプ、発電機、バッテリー、バッテリー充電器、圧縮器、ホース、カップリング、道具類、デブリ洗浄機器及びその他の材料を含む、機器を提供
- ・ 多様な場所に機器を配置することによって、そのサイトで予測される厳しい自然現象から防護する携帯機器を合理的に防護

(「シビアアクシデント対策規制の基本的考え方に関する検討(原子力安全・保安院、平成24年7月12日)」より抜粋)

### 7.3.3 . まとめ

■福島第一発電所1号機は初期のBWRではあるが、2000年のAM対策を入れて設計を超えた事態に対する対応も考えてきたが、昨年の福島事故はプラント全体を飲み込む規模の津波を経験して、当初想定していた範囲を大幅に超えた事態になってしまった。

■設備の設計には想定が必要であるため、「想定外」を無くすためにはプラント設計の強化の繰り返しではなく、プラント外からの支援を前提としたアクシデントマネジメント対策が必要である(大規模自然災害に対する深層防護設計)。

- プラント内、サイト内、サイト外からの多段、多層なマネジメント体制とこれを有効にするための対策設備
- 上記のマネジメント設備に対する適正な設計の考え方と許認可ルール
- 緊急時の意思決定を含む教育と訓練