



資料5

福島第事故の教訓を反映した 今後の安全確保の考え方

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

2012年8月10日

目次

1. 福島事故の教訓
2. アクシデントマネージメントの改善
3. 想定外も含めた安全確保体制
4. 海外の教訓との比較
5. まとめ

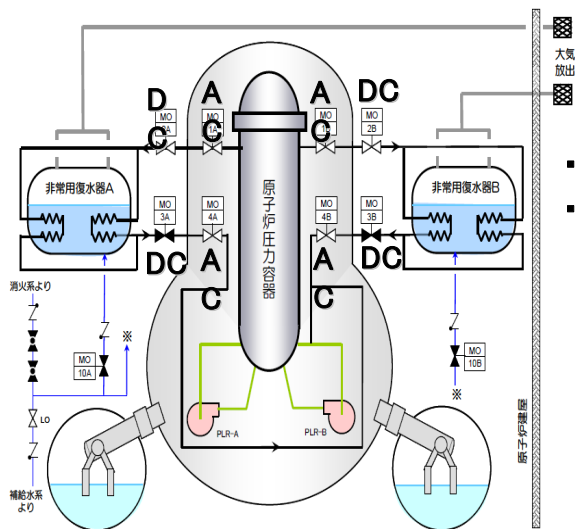
1. 福島事故の教訓

1.1. 福島第一サイトのプラントの安全設備と対策

- 原子力発電プラントは、「深層防護」を基本思想として、多重、多様な手段で安全性を確保する設計を行ってきた。
- 実際に安全設備の設計を行うためには、「設計条件」を設定する必要がある、代表的もしくは包絡的な事象シナリオを想定し、そのシナリオに適切な裕度を確保した設計条件を設定することで確実に機能する設備を設計(決定論に基づく設計)
- 一方、「深層防護」の思想に基づいて、設計で想定した事象シナリオに包含されない事態についても検討が行われ、有意なリスクに関してはリスク低減のためのAM(アクシデント・マネージメント)として安全設備以外の系統からの注水機能の強化などを実施
- 福島第一サイトのプラントは直接サイクルのBWRであるため、炉心に直接注水することが容易であることから、多種多用な注水手段を備えておくことが安全上の基本戦略

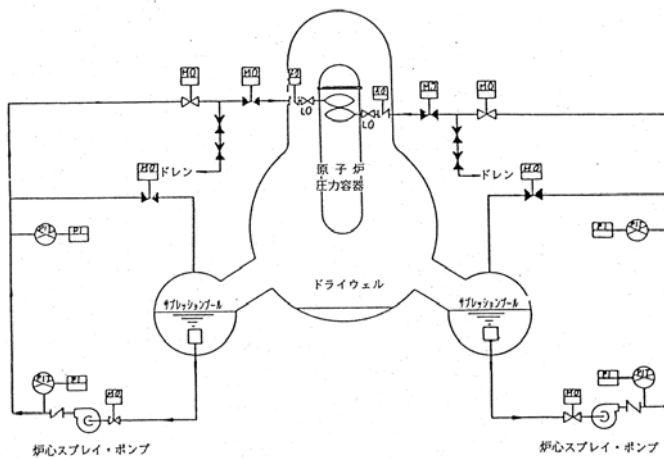
1.1.1. 福島第一 1号機の安全注水系

非常用復水器 (IC)



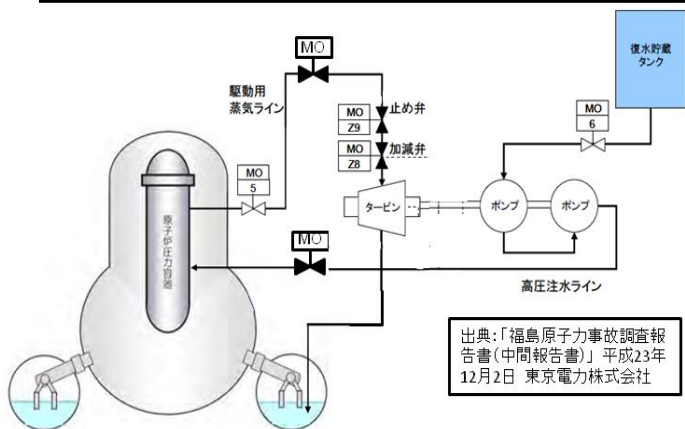
- ・100% × 2基
- ・自然循環

炉心スプレイ系 (CS)



- ・100% × 2系統
- ・非常用電源駆動

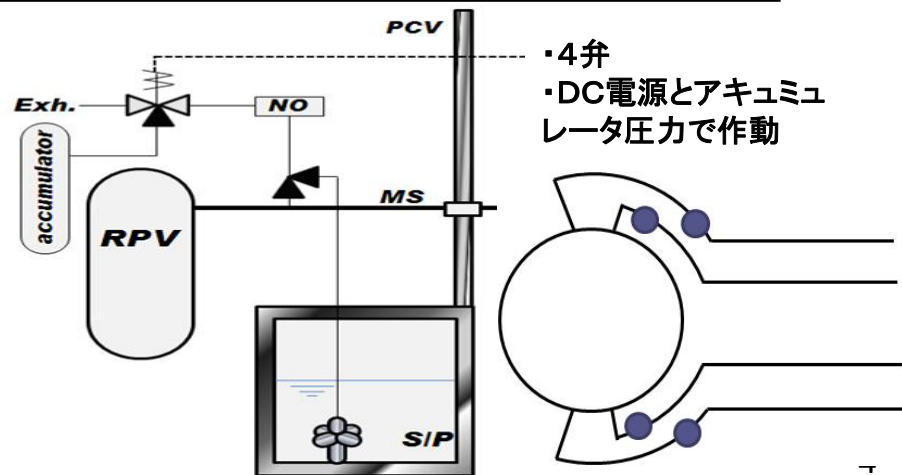
高圧注水系 (HPCI)



- ・100% × 1系統
- ・タービン駆動

出典:「福島原子力事故調査報告書(中間報告書)」平成23年12月2日 東京電力株式会社

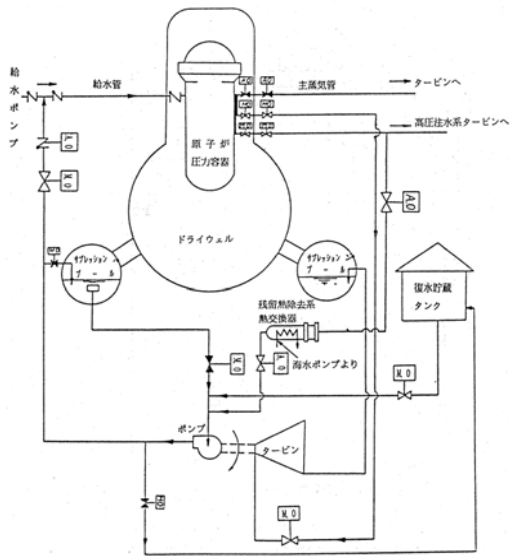
原子炉自動減圧系 (ADS)



- ・4弁
- ・DC電源とアキュムレータ圧力で作動

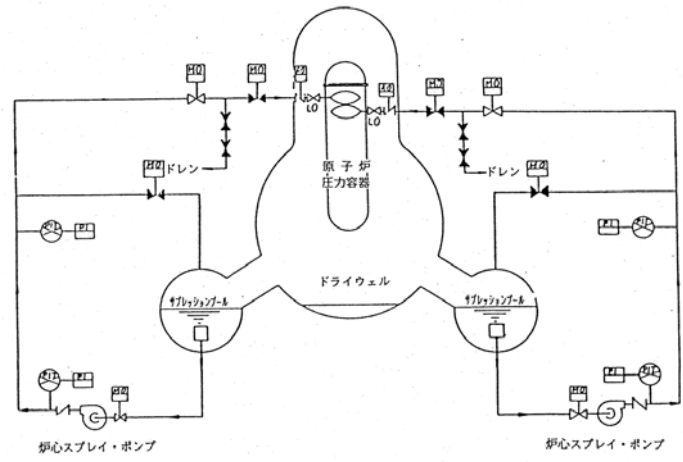
1.1.2. 福島第一 2、3号機の安全注水系(1/2)

原子炉隔離時冷却系(RCIC)



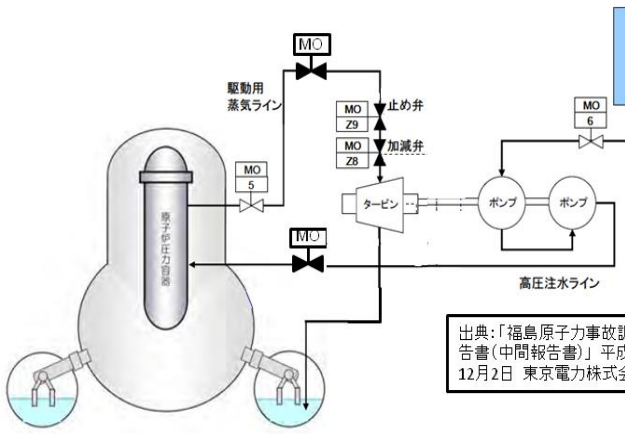
- 100% × 1系統
- タービン駆動

炉心スプレイ系(CS)



- 100% × 2系統
- 非常用電源駆動

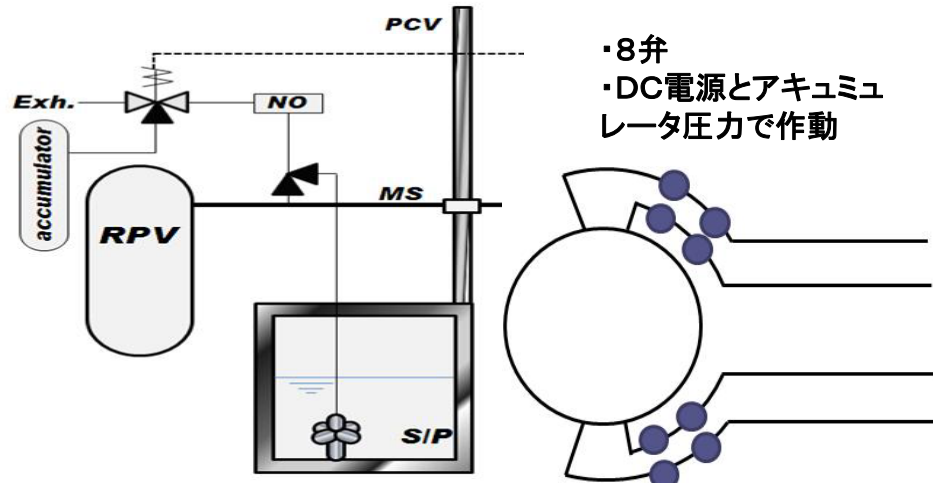
高圧注水系(HPCI)



- 100% × 1系統
- タービン駆動

出典:「福島原子力事故調査報告書(中間報告書)」平成23年12月2日 東京電力株式会社

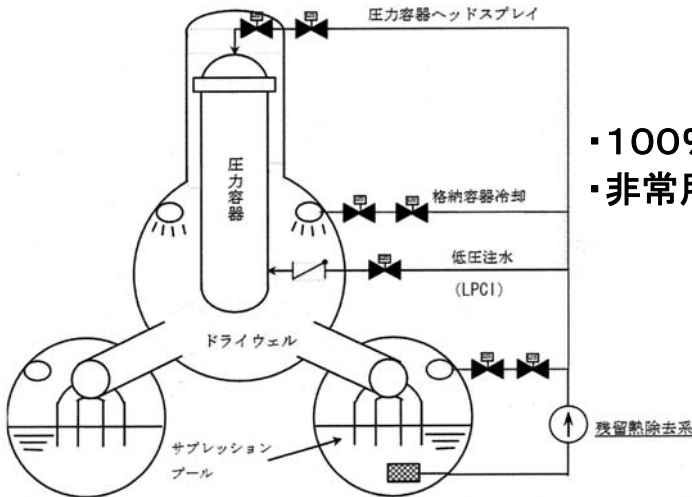
原子炉自動減圧系(ADS)



- 8弁
- DC電源とアキュムレータ圧力で作動

1.1.2. 福島第一 2、3号機の安全注水系(2/2)

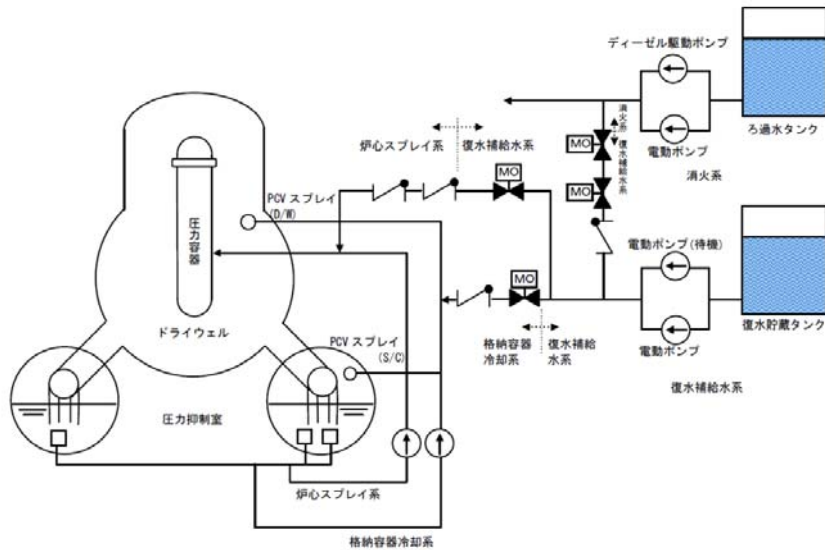
低圧炉心注水系(LPCI)



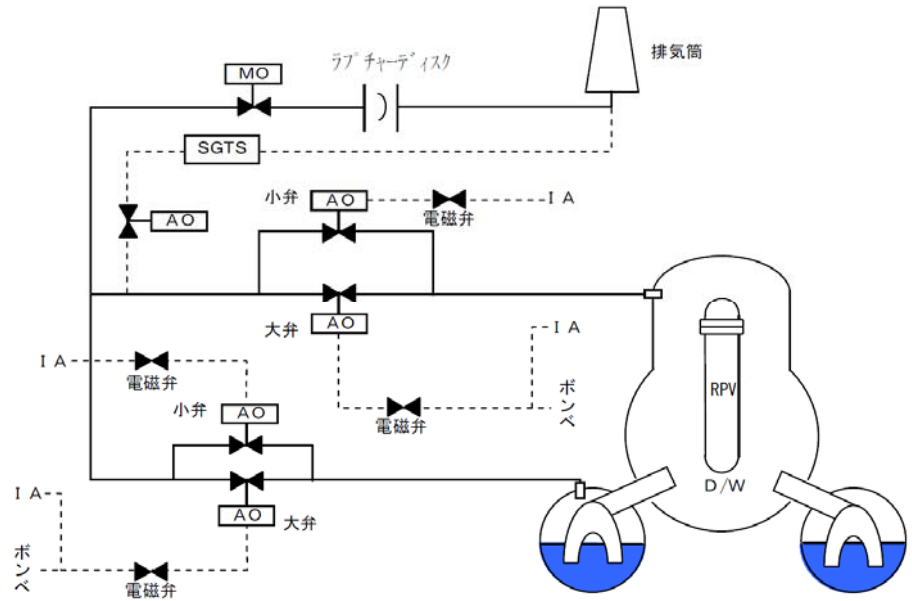
- ・100%×2系統
- ・非常用電源駆動

1.1.3. シビアアクシデント対策設備

福島第一サイトのプラントでは、設計想定を超えた事態におけるリスク低減対策として、注水系、除熱系、電源系を多様化して、設計の想定を超えた事態をマネジメントする設備を整備

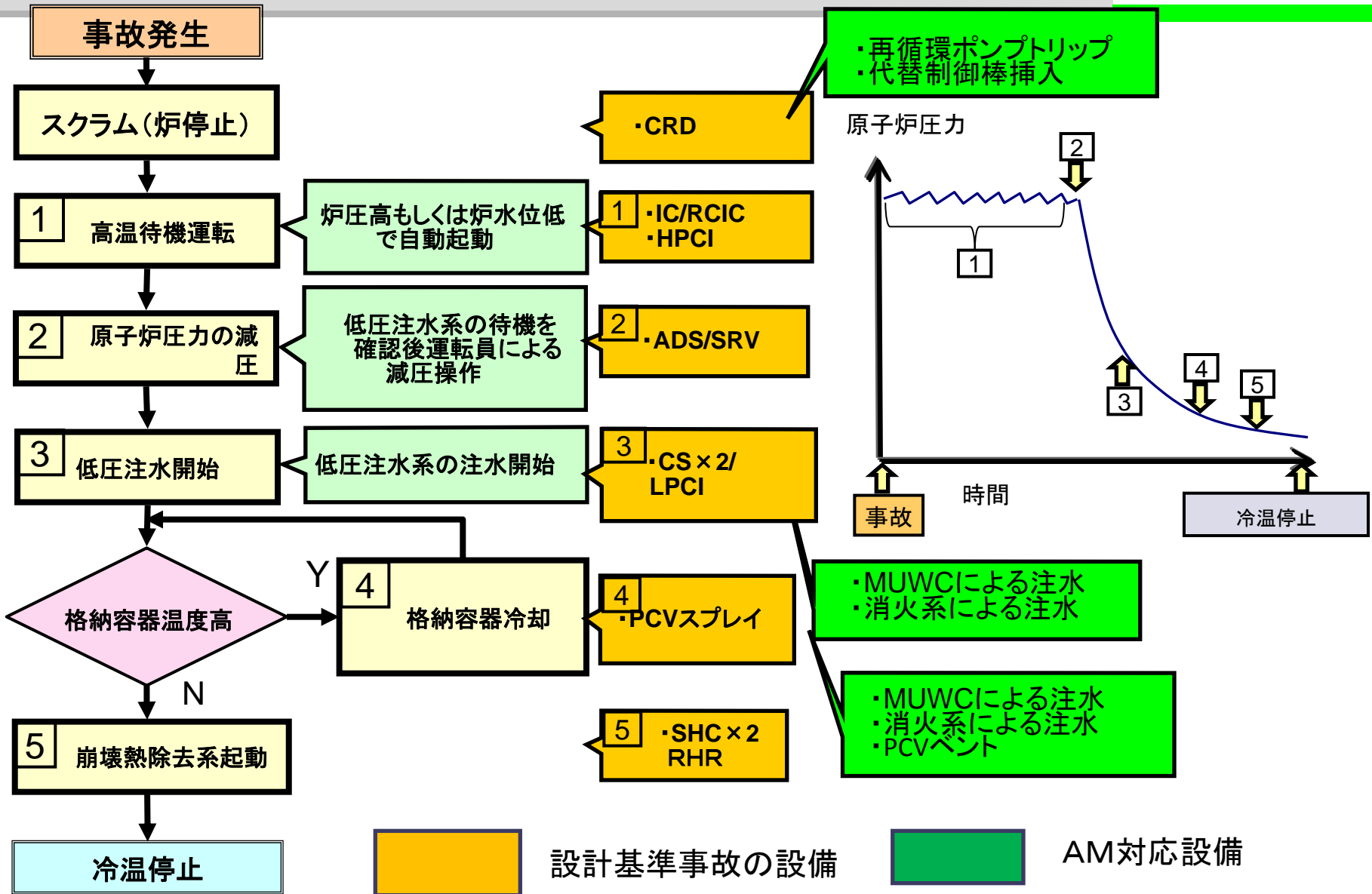


代替注水設備



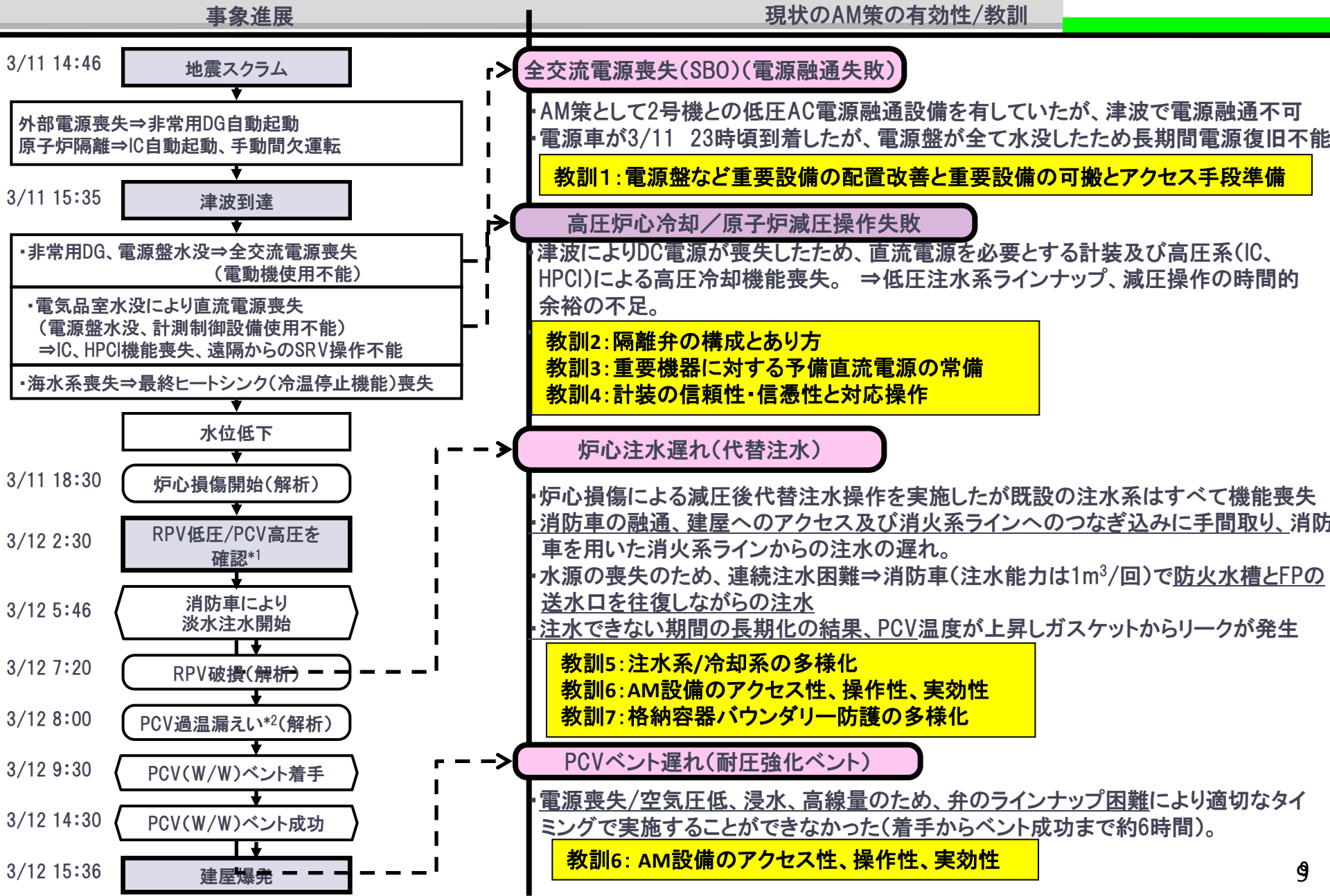
耐圧強化ベント

事故時の基本的な収束手順



1.2. 事象進展と得られた教訓

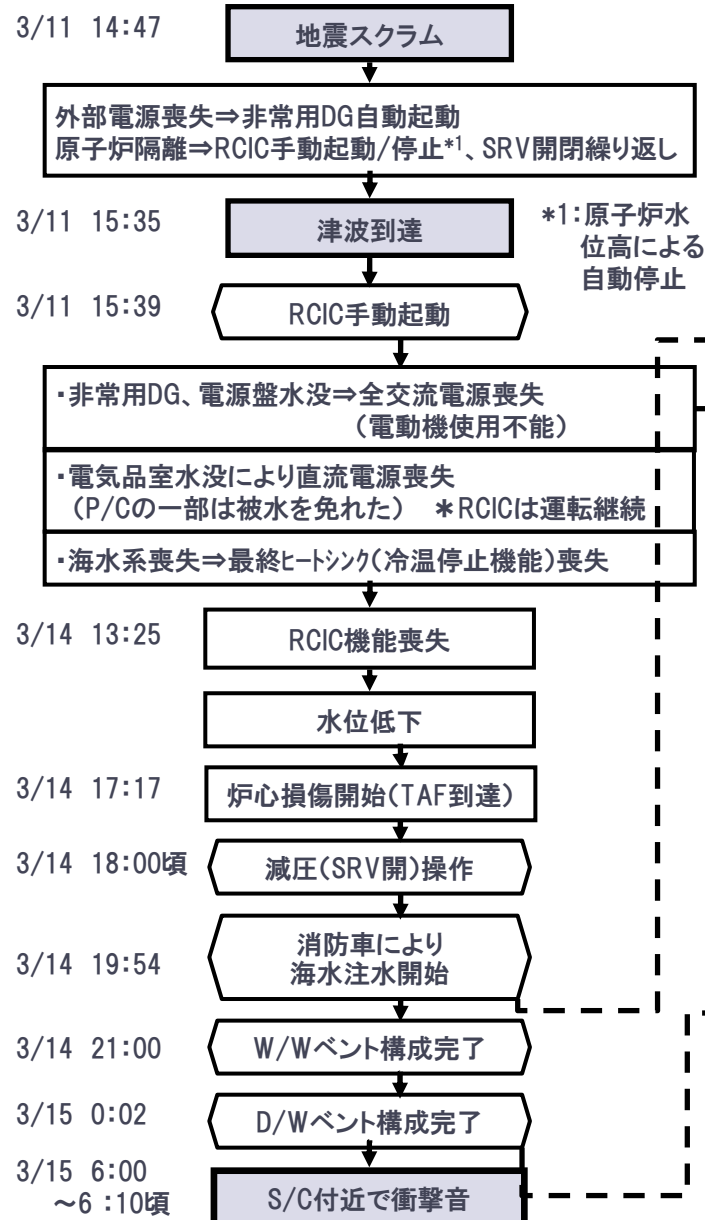
1.2.1. 1号機の事象進展と教訓



1.2.2. 2号機の事象進展と教訓

事象進展

現状のAM策の有効性/教訓



全交流電源喪失(電源融通)

AM策として1号機との低圧AC電源融通設備を有していたが、津波で電源融通不可最初の電源車が3/11 23時頃到着し、障害物でアクセスが困難中を使用可能な電源盤に接続してCRD及びSLCによる原子炉への代替注水を準備していたが、直前に1号機の建屋爆発による飛散物でケーブル及び電源車が破損

教訓1: 電源盤など重要設備の配置改善と重要設備の可搬とアクセス手段準備

原子炉減圧/炉心注水遅れ(代替注水)

- ・消防車を用いた海水注入ラインを構成していたが、3/14 11:01 3号機建屋爆発の影響で、消防車及びホースが破損して使用不能
- ・余震の発生による作業中断と退避のため、海水注入の再ライン構成の遅れ
- ・SRV開はRCIC停止後約4時間30分後に通勤用自動車バッテリーにより中操計器盤から実施したが、電圧が不足などで手間取り、開操作着手から約2時間遅れ
- ・また、S/Cの温度/圧力が高く、凝縮しにくい状況を考慮して格納容器ベント作業を優先させたこと、さらに消防車の燃料切れによる停止が重なって、海水注入開始は、RCIC停止後約6時間30分後まで遅延

⇒減圧/低圧注水系のラインアップが遅れにり炉心損傷

教訓2: 隔離弁の構成とあり方

教訓3: 重要機器に対する予備直流電源の常備

教訓4: 計装の信頼性・信憑性と対応操作

教訓5: 注水系/冷却系の多様化

教訓6: AM設備のアクセス性、操作性、実効性

教訓7: 格納容器バウンダリー防護の多様化

PCVベント失敗(耐圧強化ベント)

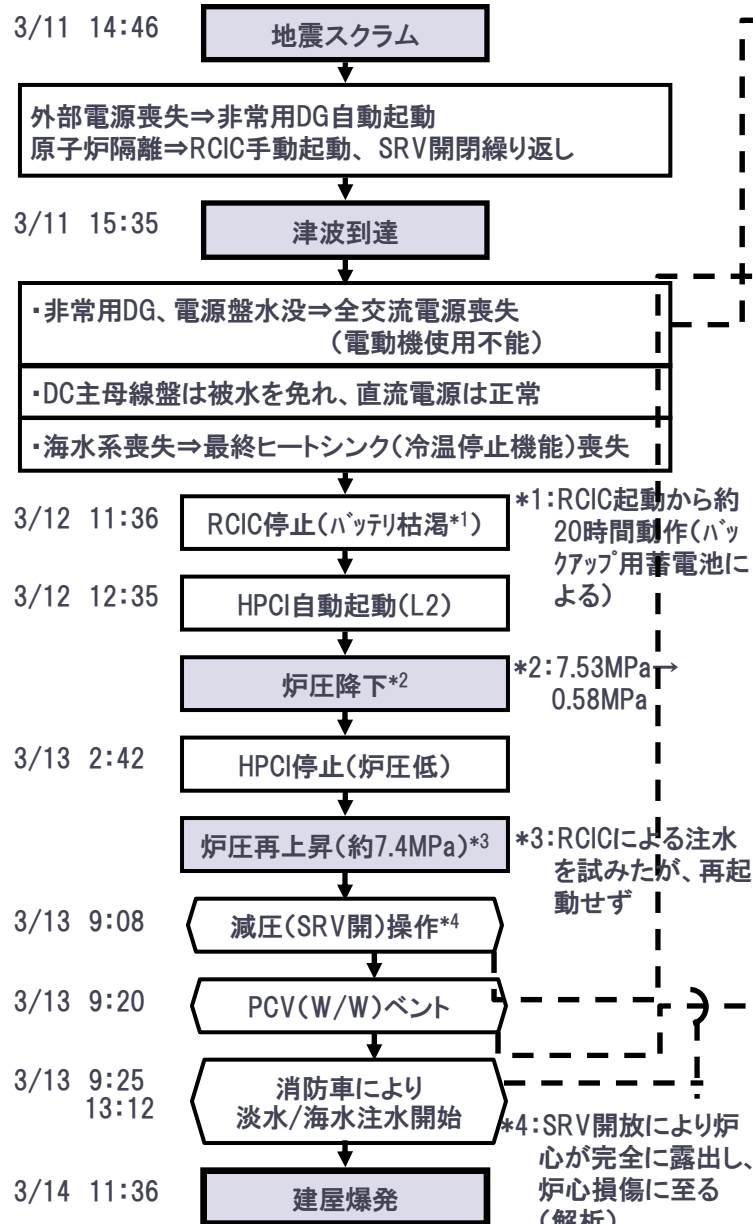
・W/Wベントのラインナップは完了したが、S/C側の圧力がラプチャーディスク作動圧よりも低いためベント失敗

教訓6: AM設備のアクセス性、操作性、実効性

1.2.3. 3号機の事象進展と教訓

事象進展

現状のAM策の有効性/教訓



全交流電源喪失（電源融通）

- ・AM策として4号機との低圧AC電源融通設備を有していたが、津波により4号機も同じ状況に陥っており、電源融通不可
- ・電源車が3/11 23時頃到着したが、電源盤水没のため長期間電源復旧不能

教訓1: 電源盤など重要設備の配置改善と重要設備の可搬とアクセス手段準備

原子炉減圧/炉心注水遅れ（代替注水）

- ・HPCI停止直後に減圧のためのSRV開操作を試みるが、空気供給ラインの電磁弁励磁用のバッテリーが不足（予備バッテリーは1、2号機に使用）し、減圧失敗
- ・炉圧が再上昇したため、消火系のディーゼル駆動消火ポンプ（D/D FP）（3/12 18時頃ラインナップ完了）により注水を試みるも失敗。
- ・消防車要請するも1号機に使われ到着せず。構内道路修復、ガラ撤去により5/6号側との往来が可能となり消防車1台到着。2Fからの消防車1台とで防火水槽の淡水を水源として注水ラインを形成。
- ・SRV開はHPCI停止から約6時間30分後に通勤用自動車バッテリーを用い、中操計器盤から実施

⇒減圧/低圧注水系のラインアップが遅れにより炉心損傷

教訓2: 隔離弁の構成とあり方

教訓3: 重要機器に対する予備直流電源の常備

教訓4: 計装の信頼性・信憑性と対応操作

教訓5: 注水系/冷却系の多様化

教訓6: AM設備のアクセス性、操作性、実効性

教訓7: 格納容器バウンダリー防護の多様化

PCVベント開状態維持困難（耐圧強化ベント）

- ・照明用小型発電機を用いた弁励磁、ポンベ交換によりベントに成功。
- ・ただし、A0弁駆動用空気圧や空気供給ラインの電磁弁励磁の維持が困難となり、開状態維持が困難。開操作を複数回実施。

教訓6: AM設備のアクセス性、操作性、実効性

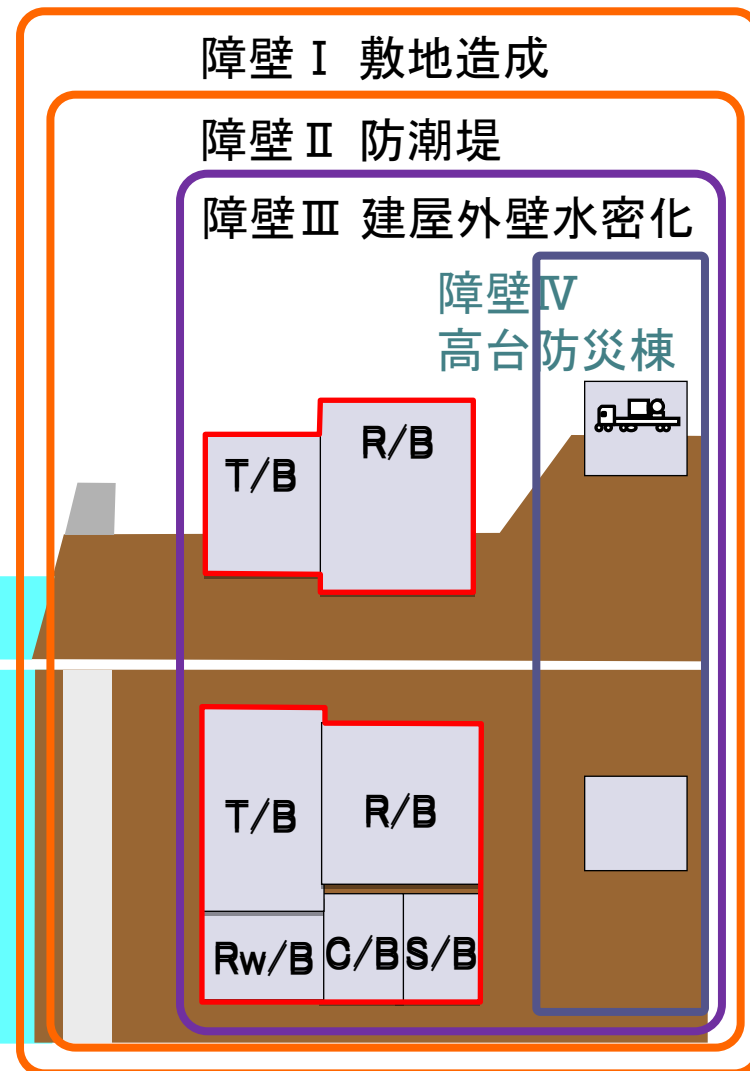
教訓1：電源設備など重要設備の配置改善と重要設備の可搬と緊急時のアクセス手段

- 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

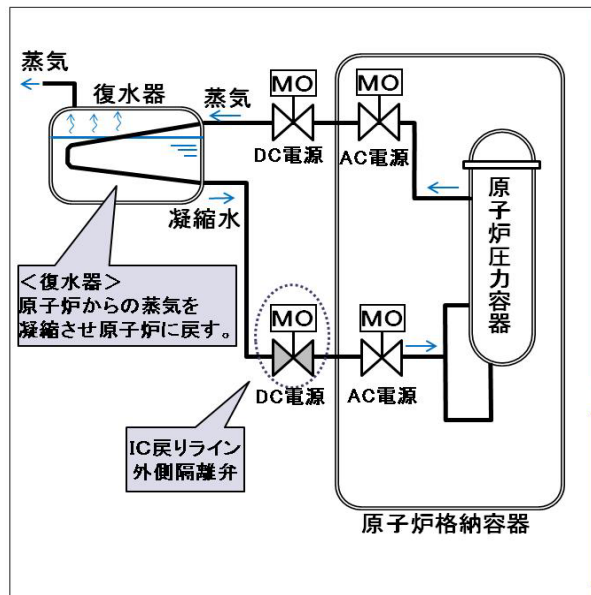


- 想定高さを超えた津波やその他の外部リスクに対しては、別の場所からの可搬もしくは仮設による復旧対策が必要
- 電源車、電源盤、注水系などの高台や防災棟(完全水密建屋など)に常備
- 緊急時のアクセスのために、緊急取り付け口の確保とアクセスルート作成のための重機の常備

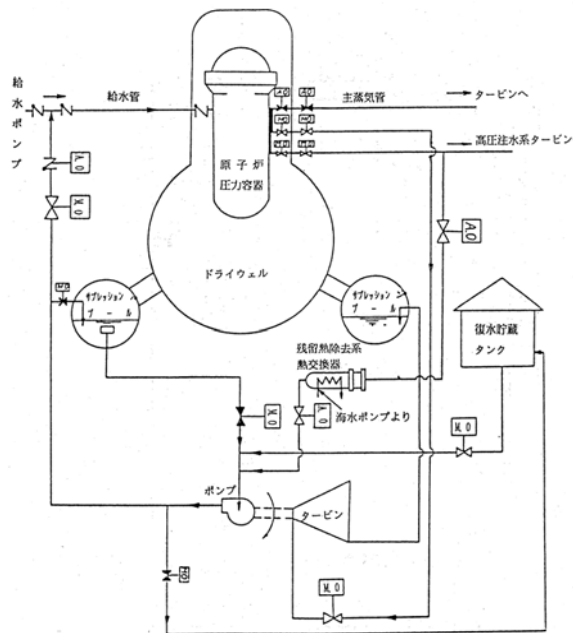


教訓2: 隔離弁構成のあり方

- 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



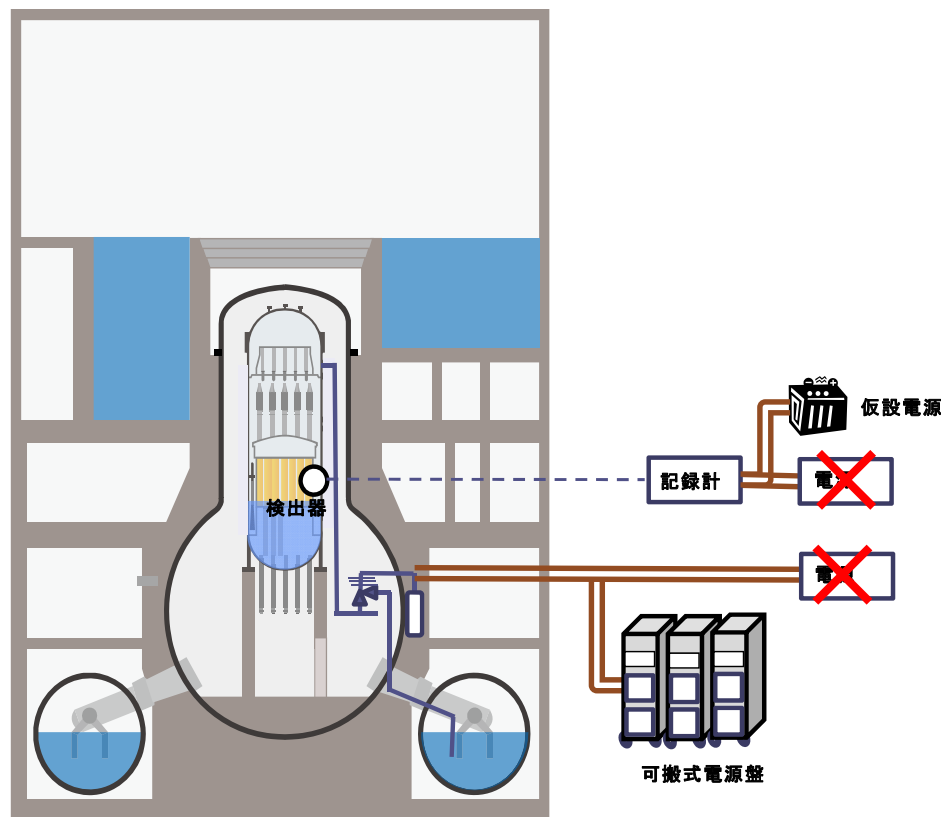
ICの隔離弁構成



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

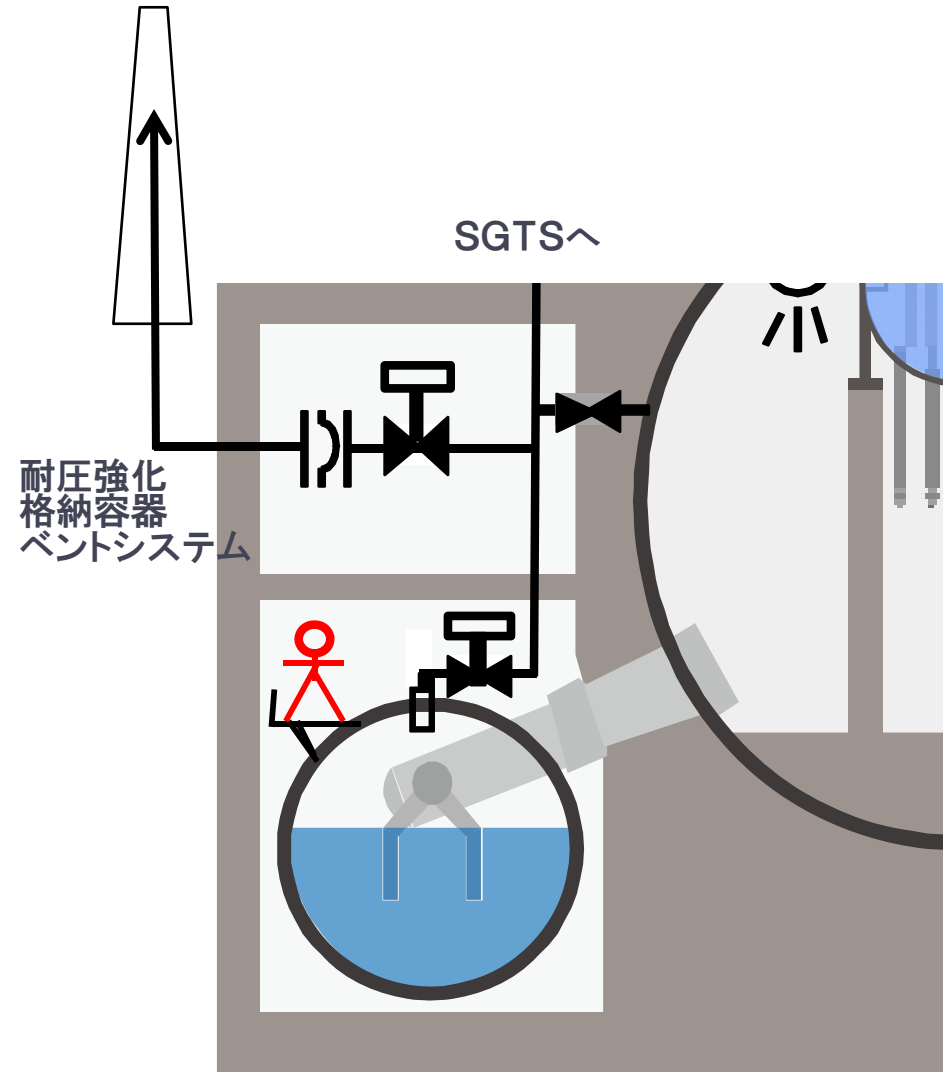
WWベント弁のアクセス性とラプチャーディスクの問題

◆ 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



アクセシビリティ, 操作性, 実行性の改善

◆アクセシビリティの改善例

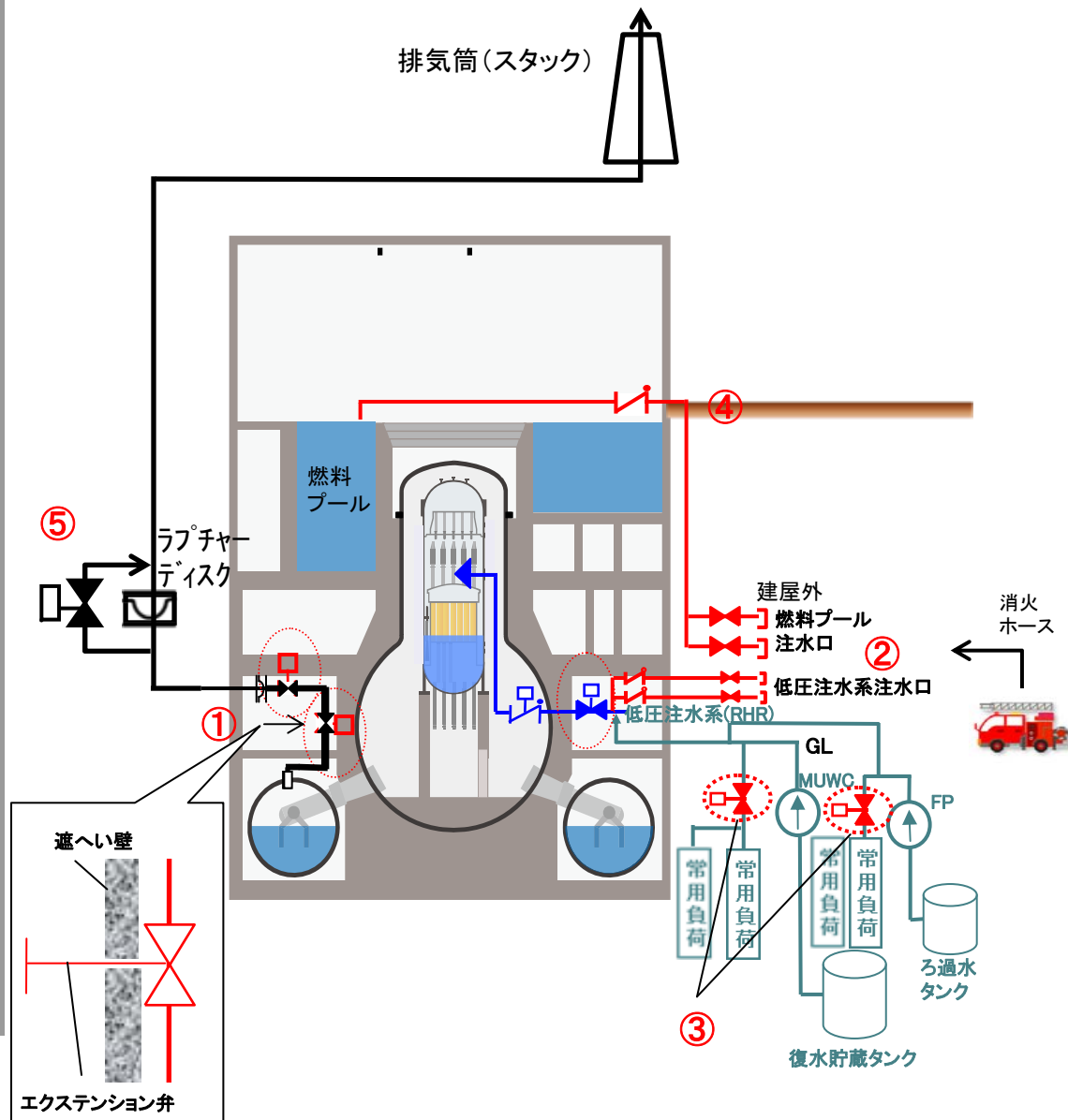
- ① 遠隔手動ハンドルを追加により, 操作時の被曝を低減
- ② 代替注水の注水口の分散配置により, 容易に接続可能な構成

◆操作性の改善例

- ③ 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
- ④ 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

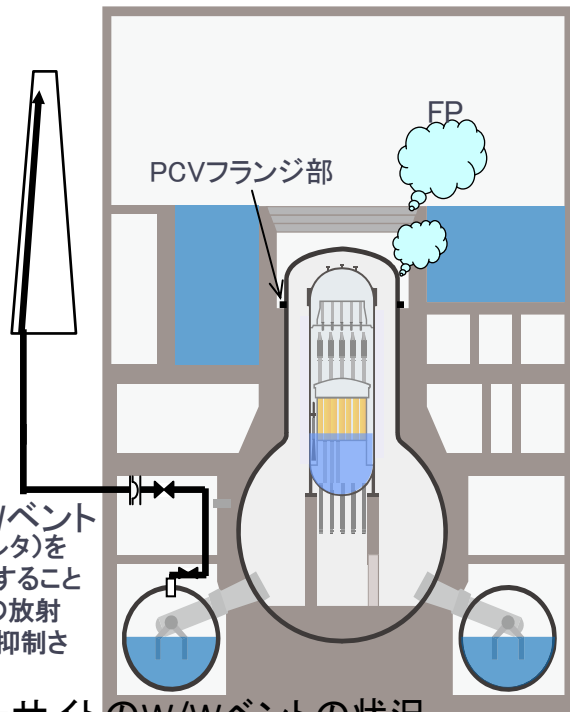
◆実行性の改善例

- ⑤ 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

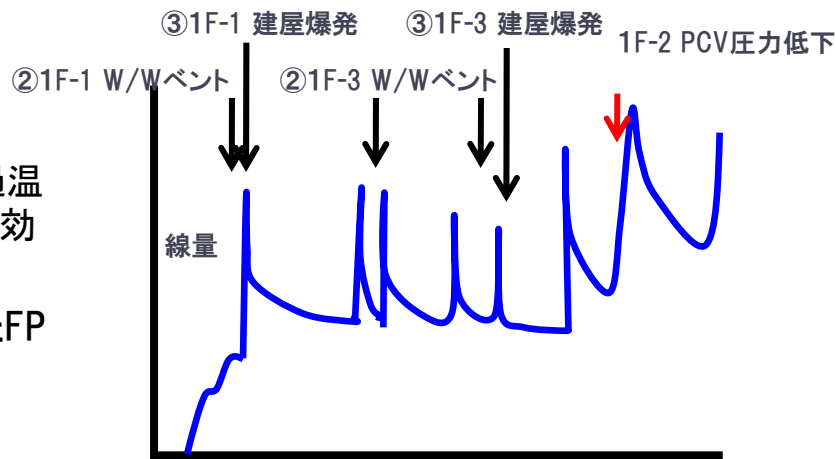
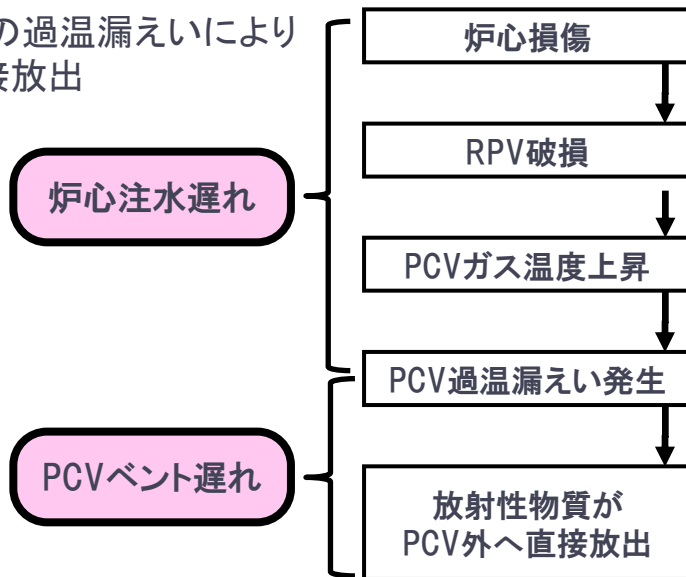


教訓7: 格納容器バウンダリー防護の多様化

事象進展



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



- ①W/Wベント以前からバックグラウンドの上昇
- ②W/Wベント時の線量の影響は確認できない。
- ③1F-2PCV圧力低下以降にバックグラウンドが上昇

- 福島第一サイトのW/Wベントの状況
 - 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、W/Wベントによる放射性物質放出抑制を効果的に実施できなかった可能性が高い。
 - バックグラウンド上昇の主要因は、R/Bに直接放出されたFPが建屋爆発により環境へ放出されたものと考えられる。

- 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

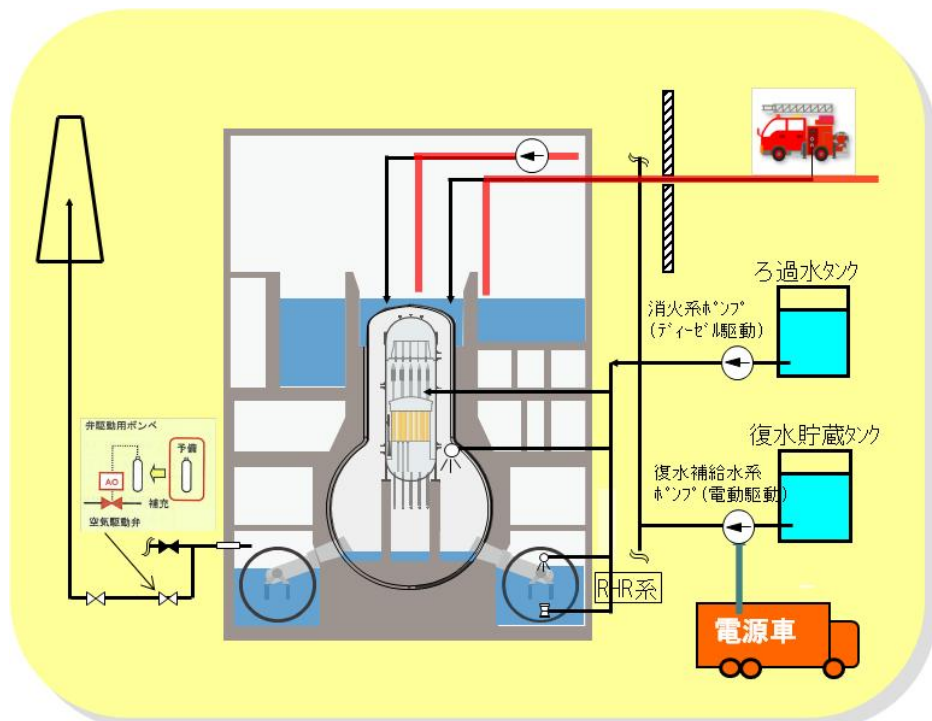
1.3. 福島事故の教訓のまとめ

- 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・マネージメント)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
 - 事態に応じた的確な判断と指示、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

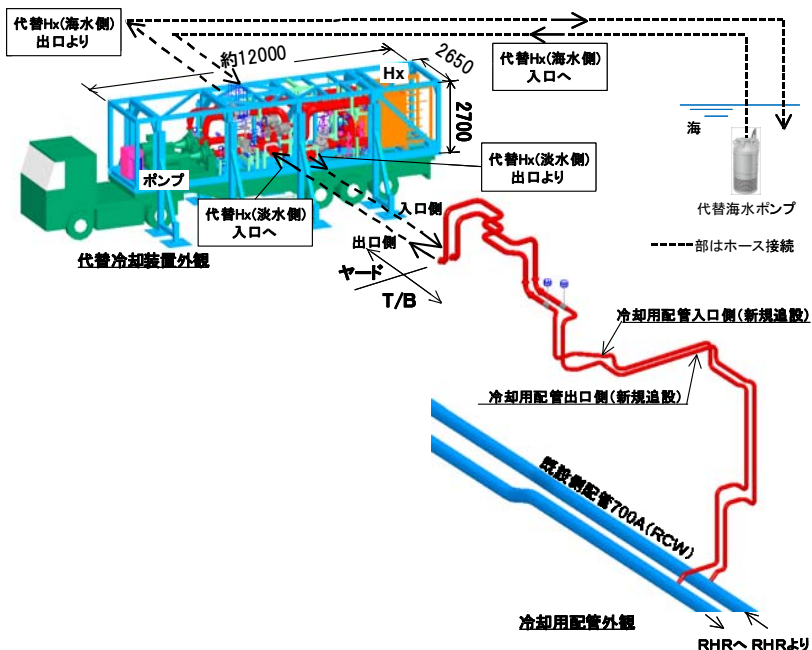
2. アクシデント・マネージメントの改善

- 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

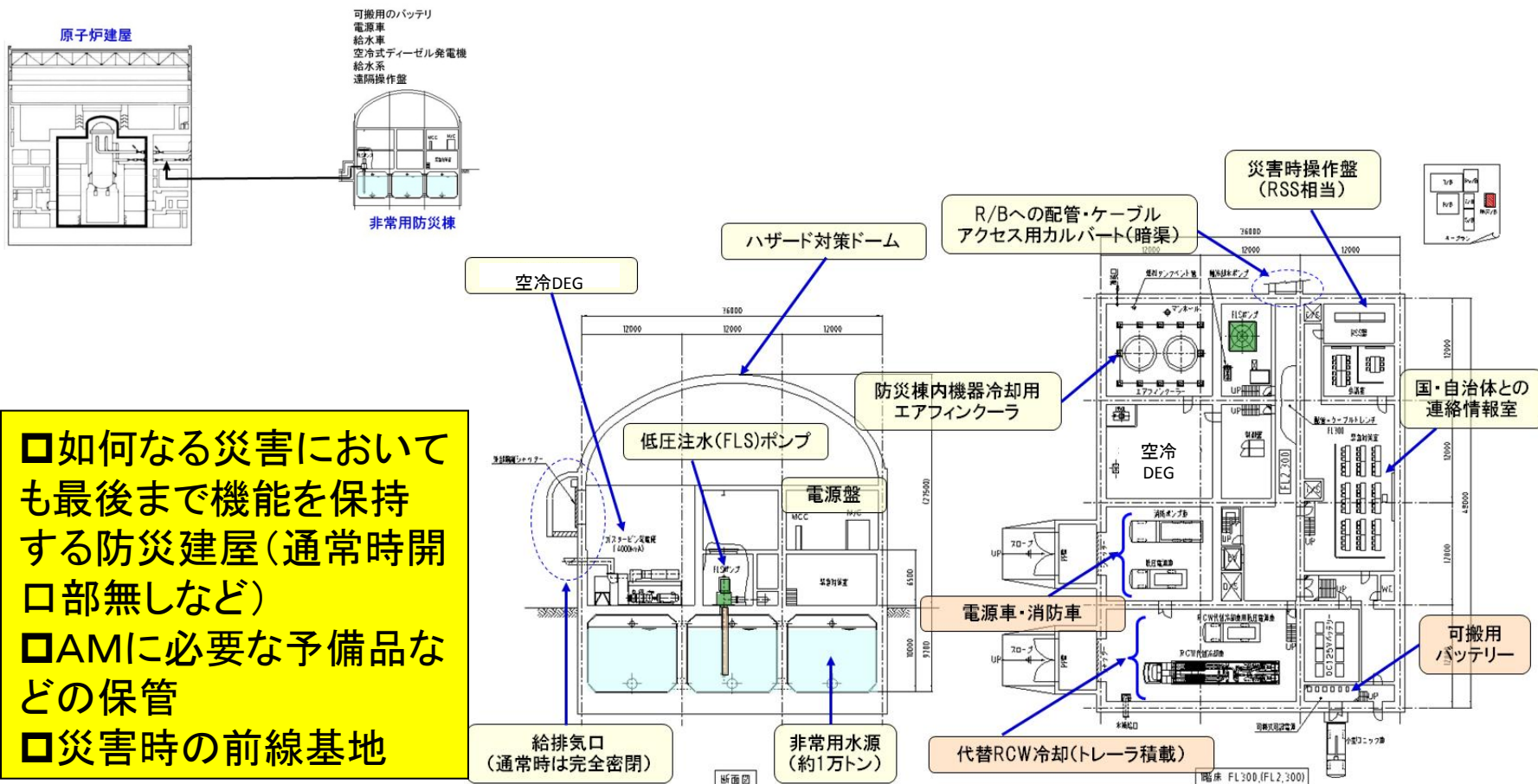


プラント外からの救援体制



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

3. 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

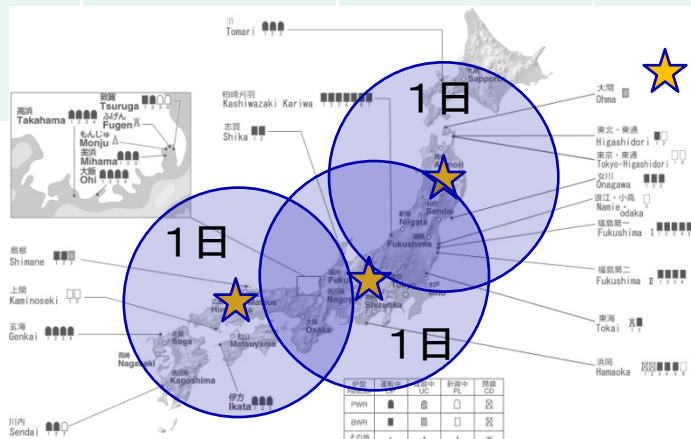
- 事故の発生防止～炉心損傷防止までは、個々の事業者による安全確保
 - 高い信頼性と裕度のある設備と運転・保守管理による事故発生防止と影響緩和
- 炉心損傷に至った場合、個々の事業者だけで事態を収束できなくなる可能性が高くなるため、事業者だけでなく行政も含めた多面的(機材、情報共有体制、連携活動訓練など)な安全確保体制

(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

4. 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)

5. まとめ

□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

- ◆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