

# 福島第一発電所1号機の安全設計 と事故の教訓及び対策

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

2012年5月8日

1. 福島第一発電所1号機の安全設計について
2. 福島事故からの教訓
3. 今後のあるべき姿と対策
4. まとめ

## 1. 1. 設計基準と安全設備の設計

- 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してきた(決定論に基づく設計)。
  - 単一故障の仮定
  - クイック起動の要求
  - 設計マージンの要求 など
- 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努力を払ってきた。しかしながら、多重故障や特定が難しい事象を対象とするために、決定論に基づく設備での対応よりはAM(アクシデント・マネージメント)を主体として整備してきた。

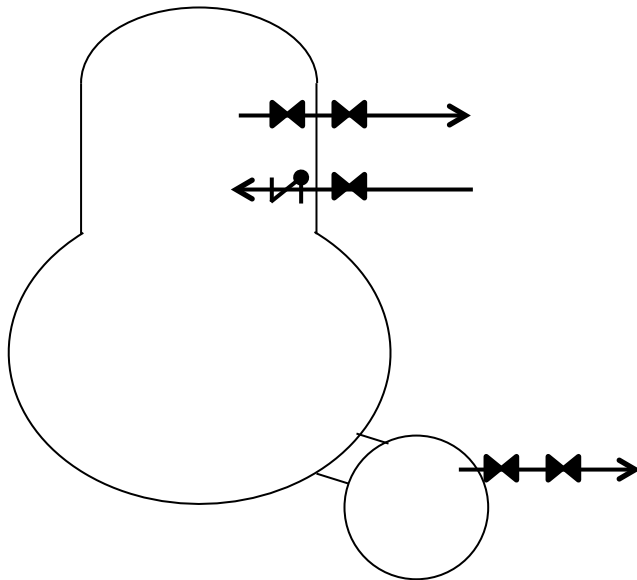
## 1.2. 安全設備の設計

### 1.2.1. 格納容器及び隔離機能

設計条件: 冷却材喪失事故時に放射性物質を系外に放散することを防ぐこと

設備の仕様:

- 格納容器のバウンダリーは、想定事象で発生する温度・圧力に耐えること
- 格納容器を貫通する一次系配管には基本的にバウンダリーの内側と外側に隔離弁設置し、異常時には自動的に閉鎖すること



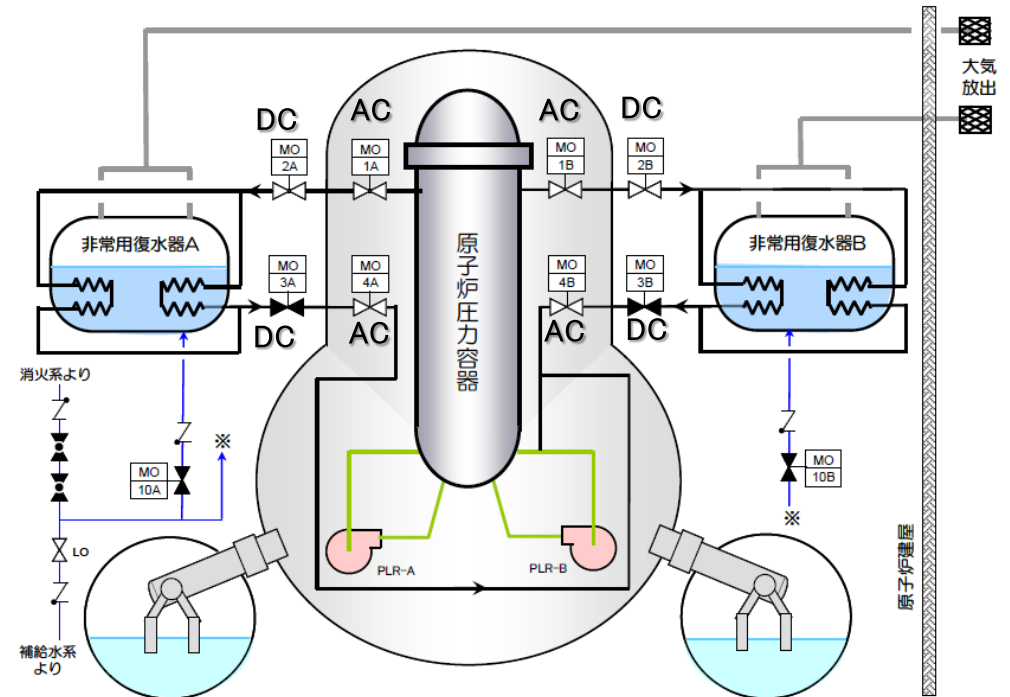
- ✓ 内側/外側: 通常時開、事故時閉 例 MSIV
- ✓ 内側(逆止弁)/外側: 通常時閉、事故時開 例 ECCS
- ✓ 外側/外側: 内側環境が厳しい系統 例 W/Wベント
- ✓ 上記の隔離弁は通常フェイルクローズで設計

# 1. 2.2. 原子炉補助冷却系

## 非常用復水器 (IC)

設計条件:タービントリップなど主復水器が利用できない原子炉隔離時の崩壊熱除去  
設備の仕様:

- 設置台数:100%×2基(1基で崩壊熱除去が可能)
- 起動条件:原子炉圧力高(15秒継続)
- 駆動方式:自然循環
- 設備容量:2基で8時間の崩壊熱除去
- 原子炉隔離時の挙動
  - 隔離発生により原子炉圧力上昇
  - 数秒後に逃し安全弁が作動し圧力上昇を抑制
  - 原子炉圧力高信号によりICが起動して崩壊熱除去開始(不要な逃し弁作動を回避)
  - 除熱過多のため戻り側の弁の開閉で原子炉圧力を制御



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

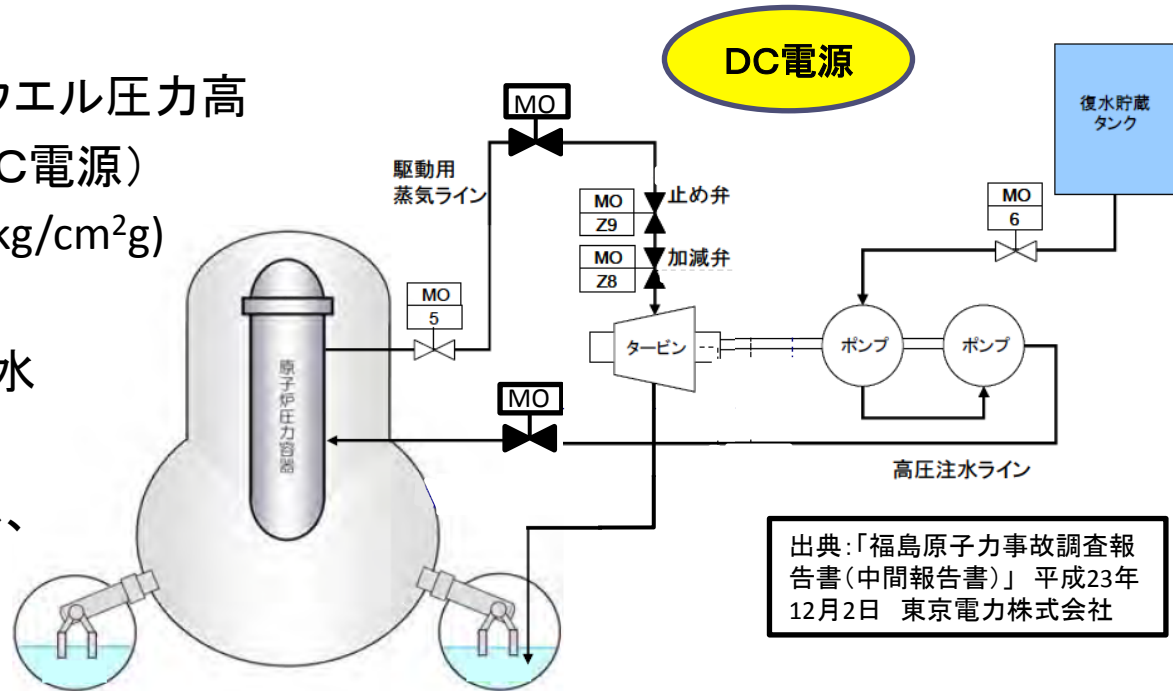
# 1. 2.2. 原子炉補助冷却系

## 高圧注水系 (HPCI)

設計条件: 目的: 原子炉一次系配管の小破断に対して炉心を注水冷却 (原子炉隔離のバックアップ含む)

設備の仕様:

- 設置台数: 100%×1 系統
- 起動条件: 水位低 or ドライウエル圧力高
- 駆動方式: タービン駆動 (DC電源)
- 設備容量: 682t/h (78~9.8kg/cm<sup>2</sup>g)
- 水源: 復水貯蔵タンク or サプレッションプール水
- 小破断時の挙動:
  - ・ 水位低信号でHPCI起動し、原子炉水位は静定
  - ・ 万一HPCIが起動しない場合は、水位低で自動減圧系が起動、炉心スプレイ系で炉心冷却が可能



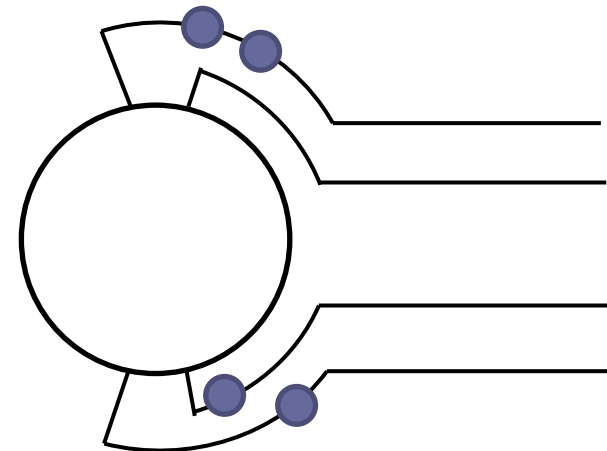
# 1. 2.2. 原子炉補助冷却系

## 原子炉自動減圧系(ADS)

設計条件: 高压注水系の不動作時に原子炉圧力を低下させ低压注水系での注水可能な状態を達成

設備の仕様:

- 設置弁数: 4弁
- 起動条件: 原子炉水位低and  
ドライウエル圧力高
- 駆動方式: 電磁弁(DC電源(区分 I / II))
- 事故時の挙動
  - ・万一HPCIが起動しない場合に、炉心スプレイ系で炉心冷却が可能にするために原子炉蒸気を圧力抑制プールに導くことで原子炉圧力を急速に低下



ADS機能付SRV配置

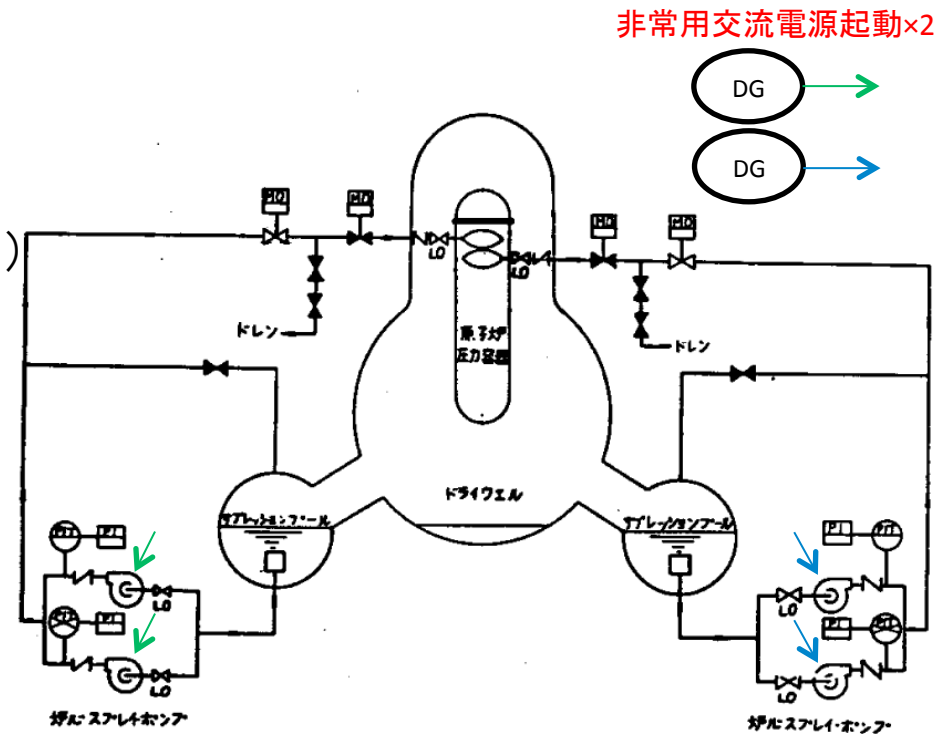
# 1. 2.2. 原子炉補助冷却系

## 炉心スプレイ系(CS)

設計条件: 冷却材喪失事故時の炉心冷却

設備の仕様:

- 設置台数: 100%×2系統  
(1系統で炉心損傷防止可能な容量)
- 起動条件: 原子炉水位低
- 駆動方式: 電動ポンプ4台(1系統2台)  
(非常用DGにより外部電源喪失に対応)
- 設備容量: 275t/h/ポンプ(揚程112m)
- 水源: サプレッションプール水
- 冷却材喪失事故時の挙動
  - ・ 大口径の配管が破断すると、水位が低下して一時的に炉心は露出
  - ・ 水位低信号でCSが起動して炉心に冷却材をスプレイすることで炉心の温度上昇を抑制





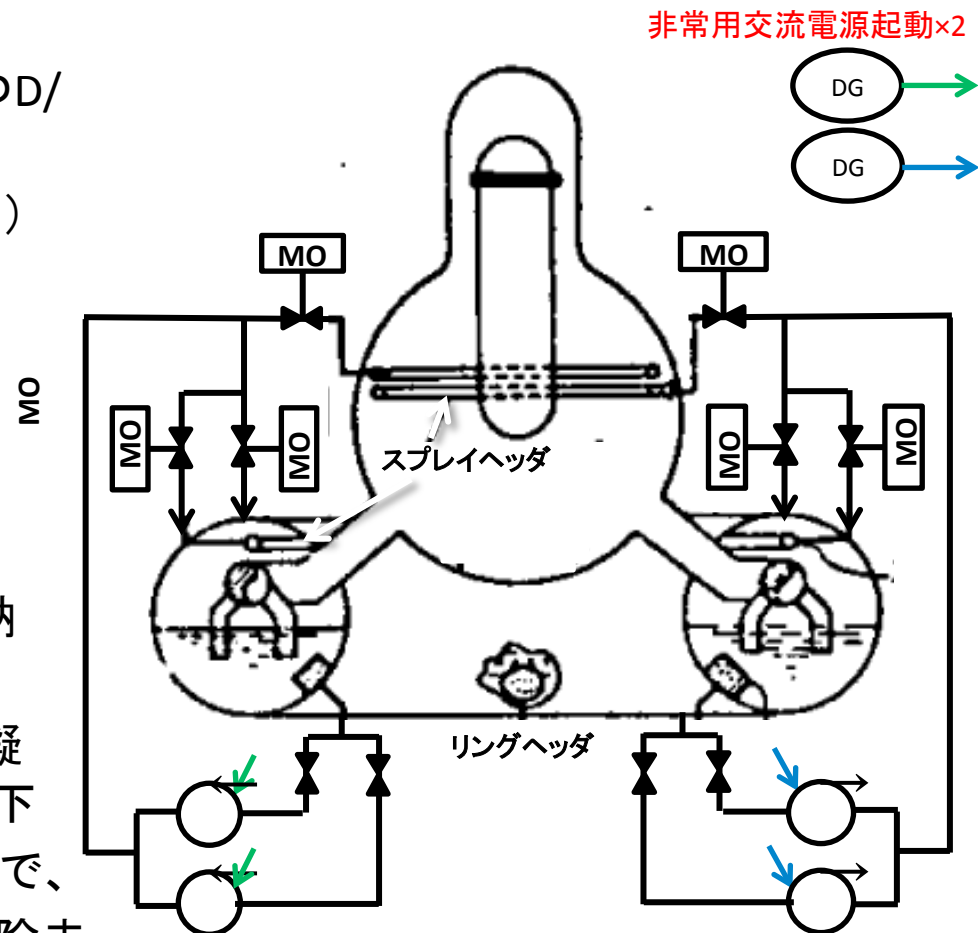
# 1. 2.2. 原子炉補助冷却系

## 格納容器冷却系(CCS)

設計条件: 冷却材喪失事故時の格納容器からの崩壊熱の除去

設備の仕様:

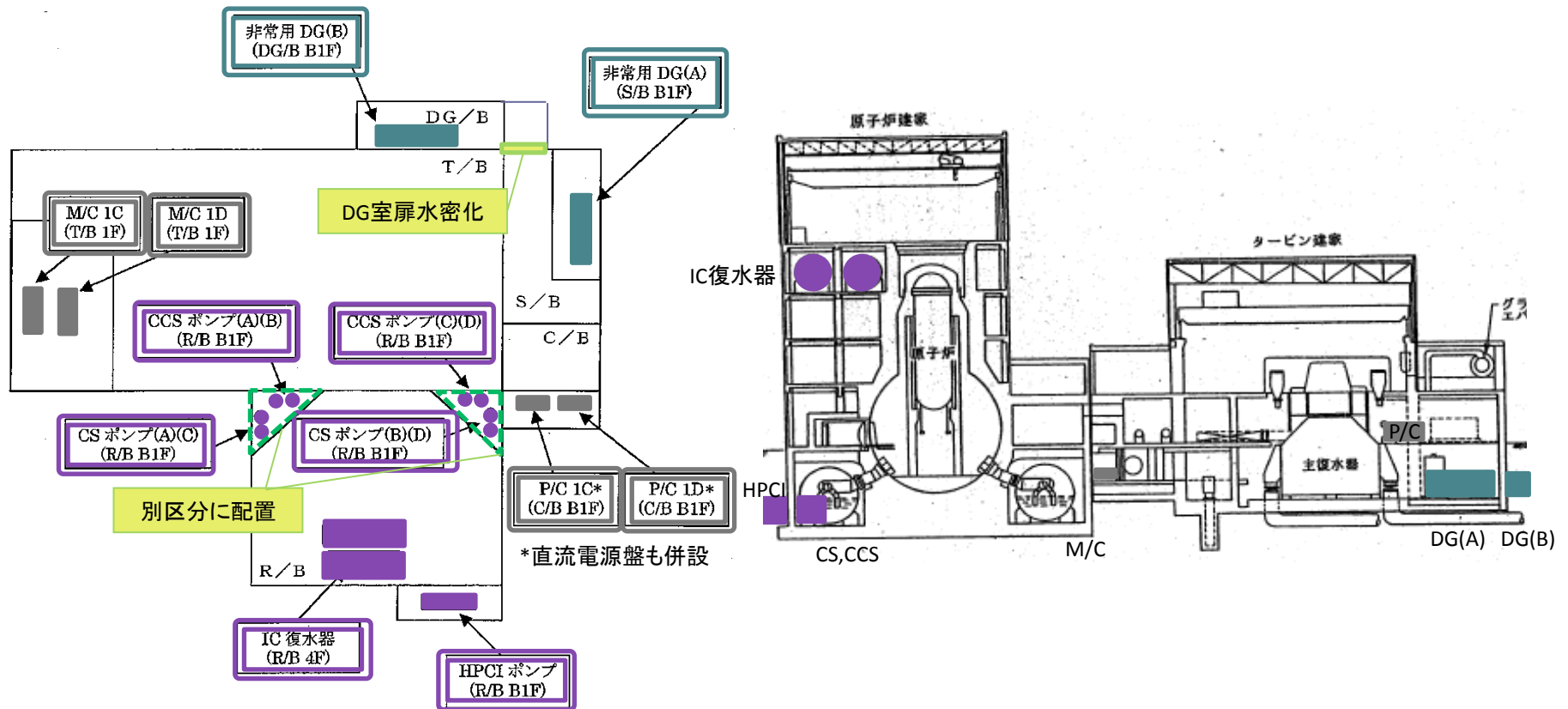
- 設置台数: 100%×2系統
- 起動条件: 原子炉水位異常低下かつD/W圧力高
- 駆動方式: 電動ポンプ4台(1系統2台)  
(非常用DGにより外部電源喪失に対応)
- 設備容量: 335t/h(14.1kg/cm<sup>2</sup>g)
- 水源: サプレッションプール水
- 冷却材喪失事故時の挙動:
  - ・冷却材喪失事故が発生すると、格納容器の圧力温度は上昇
  - ・サプレッションプールによる蒸気の凝縮で圧力温度は自動的に設計条件以下
  - ・ドライウエルスプレイを起動することで、CCS系により格納容器から崩壊熱除去開始



# 各機器・システムの配置

- 非常用DG
- 電源盤
- ECCS/除熱機器 をそれぞれ分散配置

- 各機器・システムは建屋内で分離独立を実施
- 重要なポンプ、電源設備は地下及び1階に配置



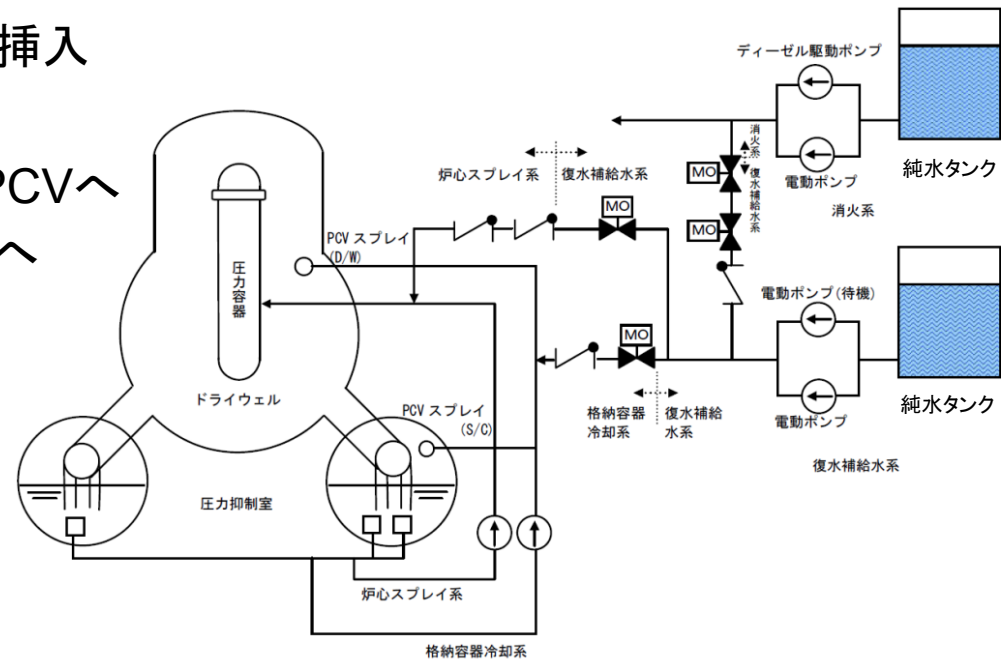
1F-1 非常用DG, 電源盤およびECCS等の配置

# 1.2.3. シビアアクシデント対策設備

2000年に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

## アクシデントマネジメント設備

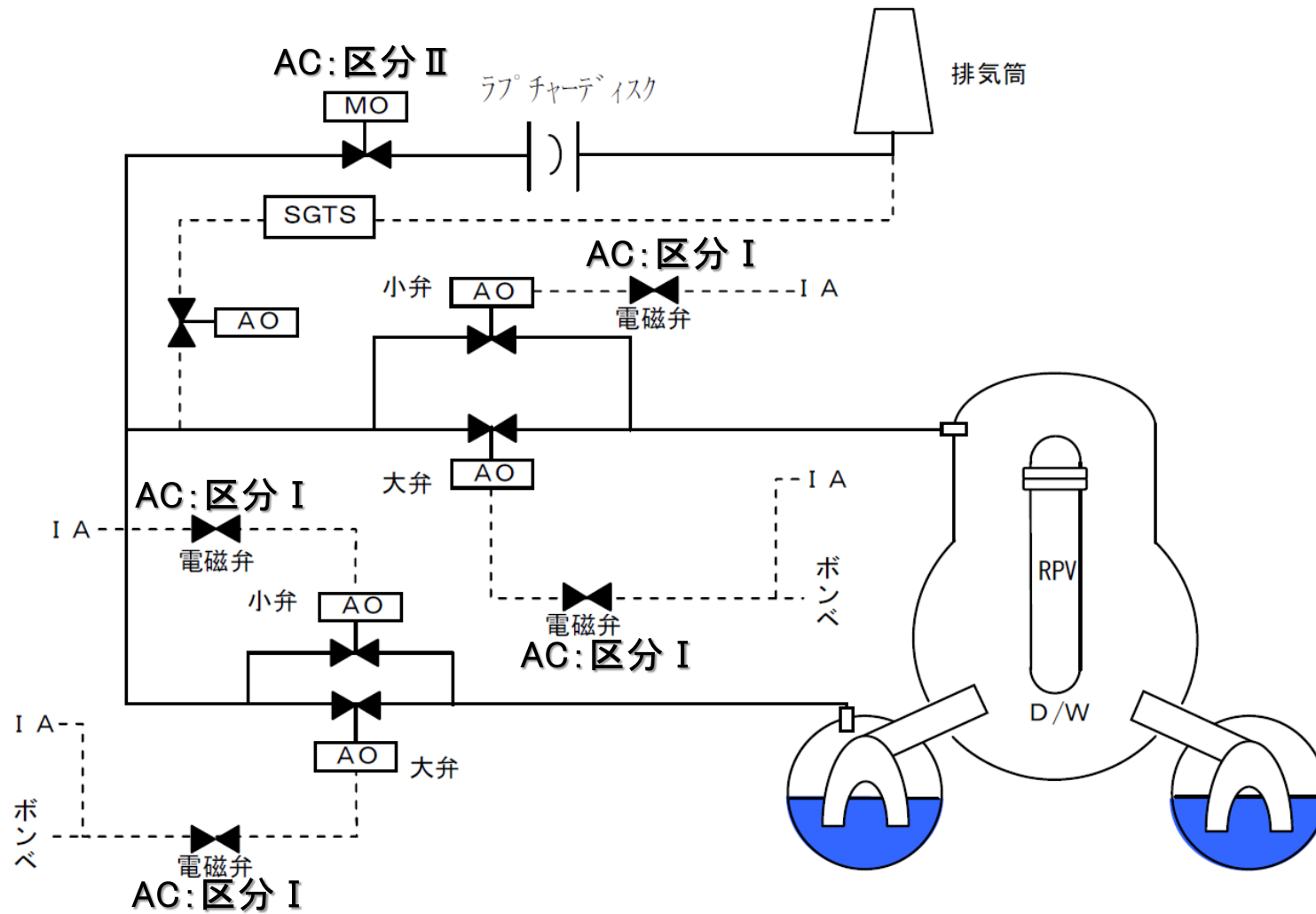
- 再循環ポンプトリップ/代替制御棒挿入
- 代替注水
  - MUWC, 消火系から原子炉/PCVへ
  - CCSからSHC経由で原子炉へ
- 格納容器除熱
  - PCVベント
  - RHR復旧手順
- 電源供給
  - 電源融通
  - EDG復旧手順



代替注水設備

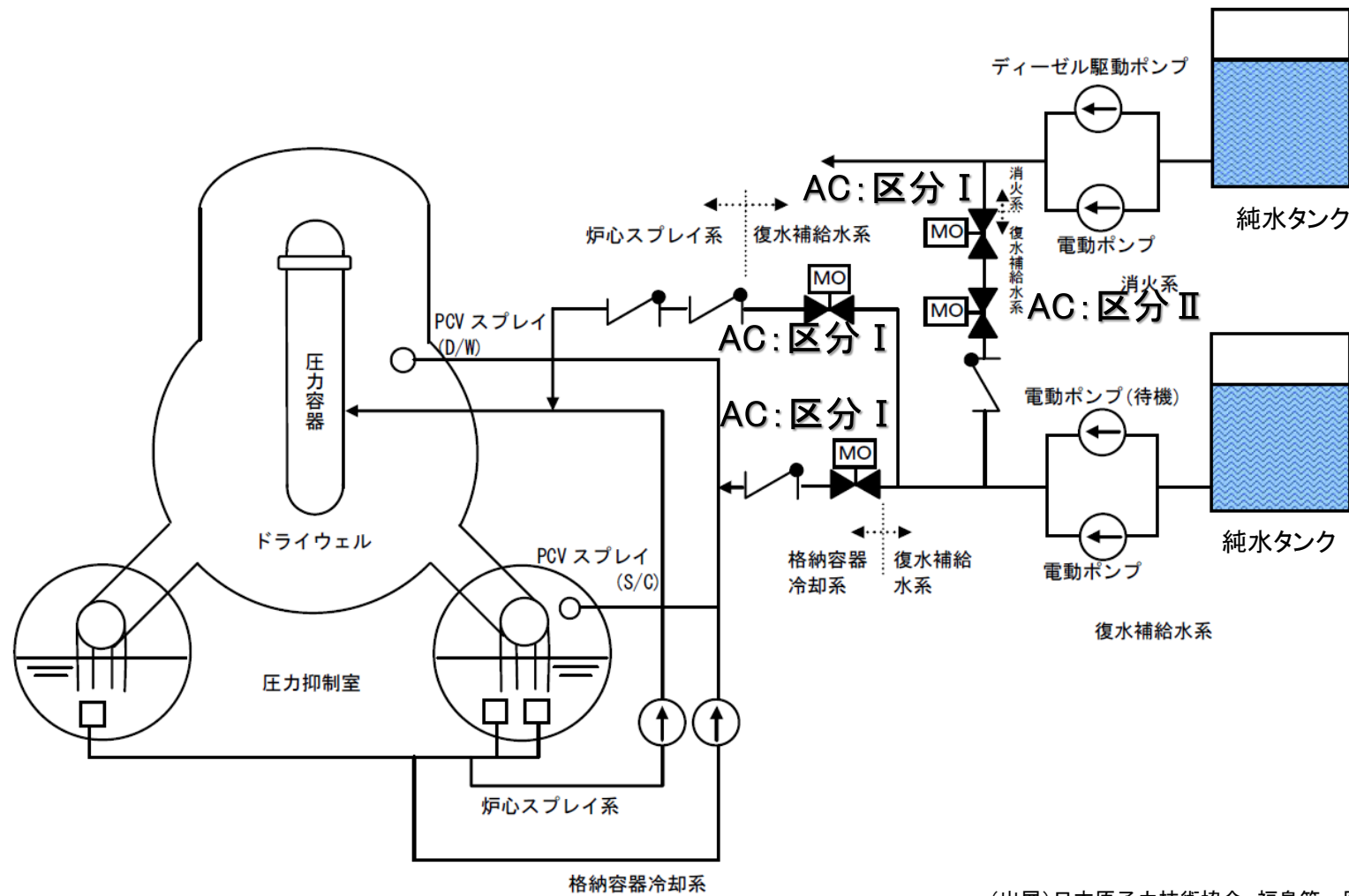
(出展) 日本原子力技術協会, 福島第一原子力発電所事故調査検討会, 「東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故の検討と対策の提言」(平成23年10月)

# AM設備：耐圧強化ベント



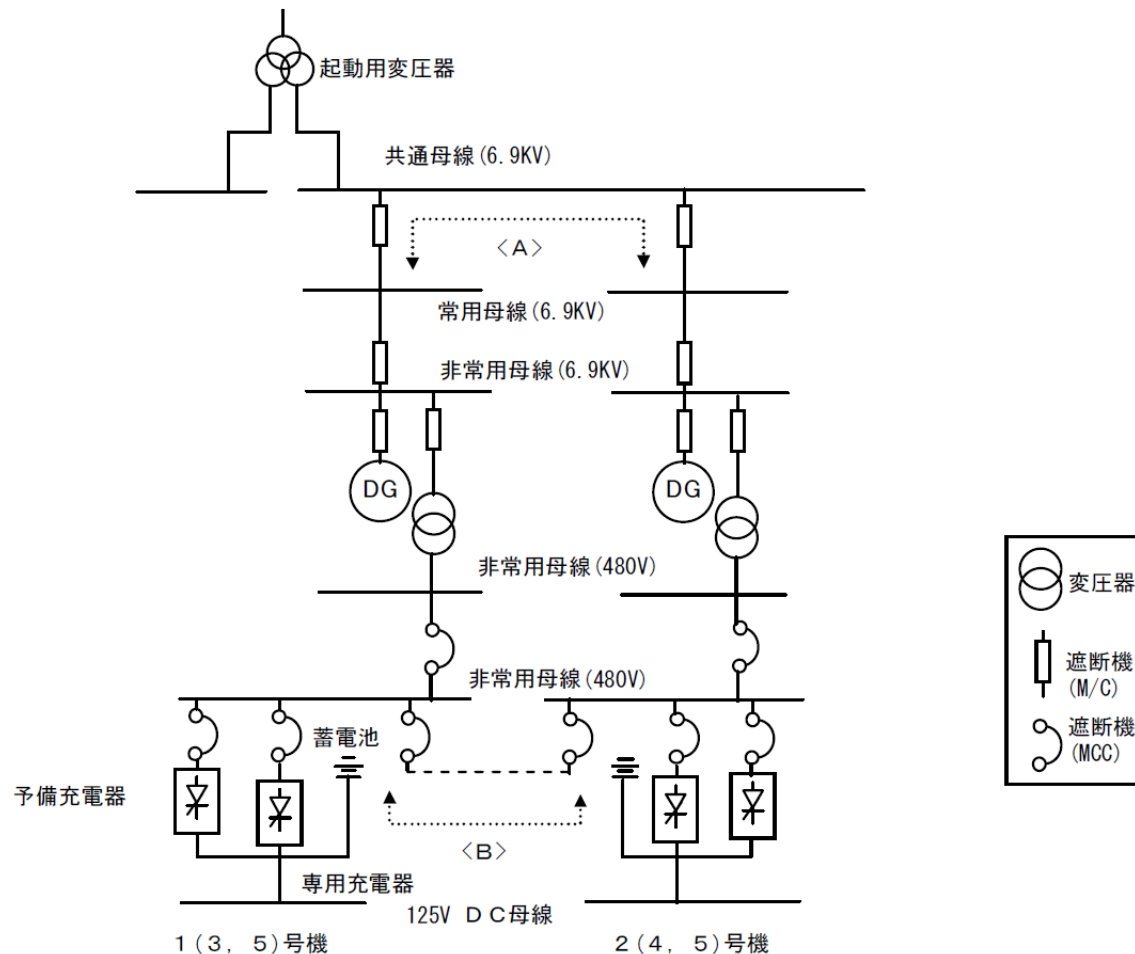
(出展)日本原子力技術協会, 福島第一原子力発電所事故調査検討会, 「東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故の検討と対策の提言」(平成23年10月)

# AM設備：代替注水設備



(出展)日本原子力技術協会, 福島第一原子力発電所事故調査検討会, 「東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故の検討と対策の提言」(平成23年10月)

# AM設備：電源融通



- <A> ルート：6.9KVのAC電源を融通する。  
(DC電源が使用できる場合のみM/C操作可能)
- <B> ルート：480VのAC電源を融通する。  
(MCCを手動操作、また、通常時MCCは開とし施錠管理することとした)

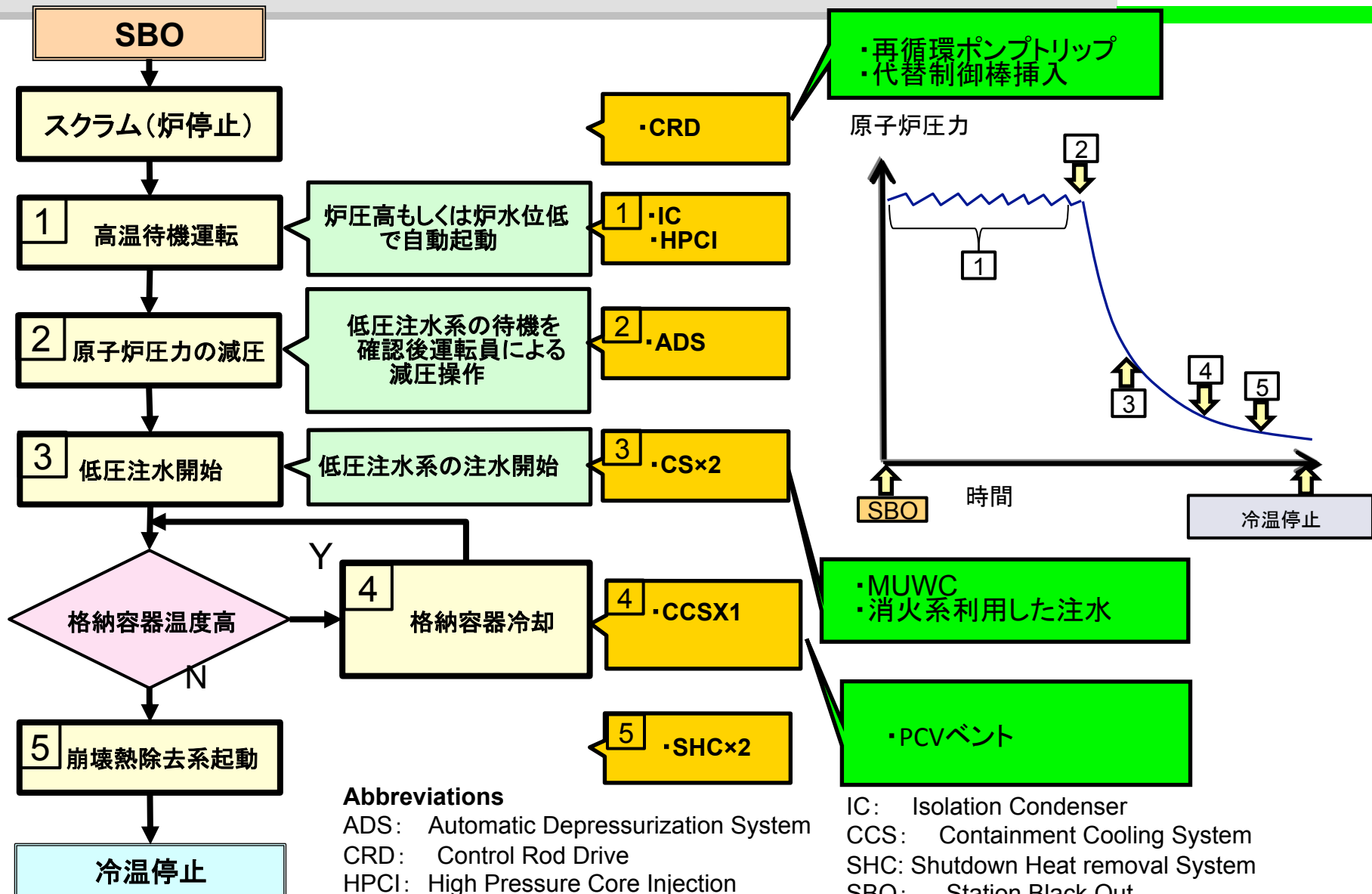
(出展)日本原子力技術協会, 福島第一原子力発電所事故調査検討会, 「東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故の検討と対策の提言」(平成23年10月)

# AM設備：代替注水の水源



東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会

# AMの操作手順の整備



### Abbreviations

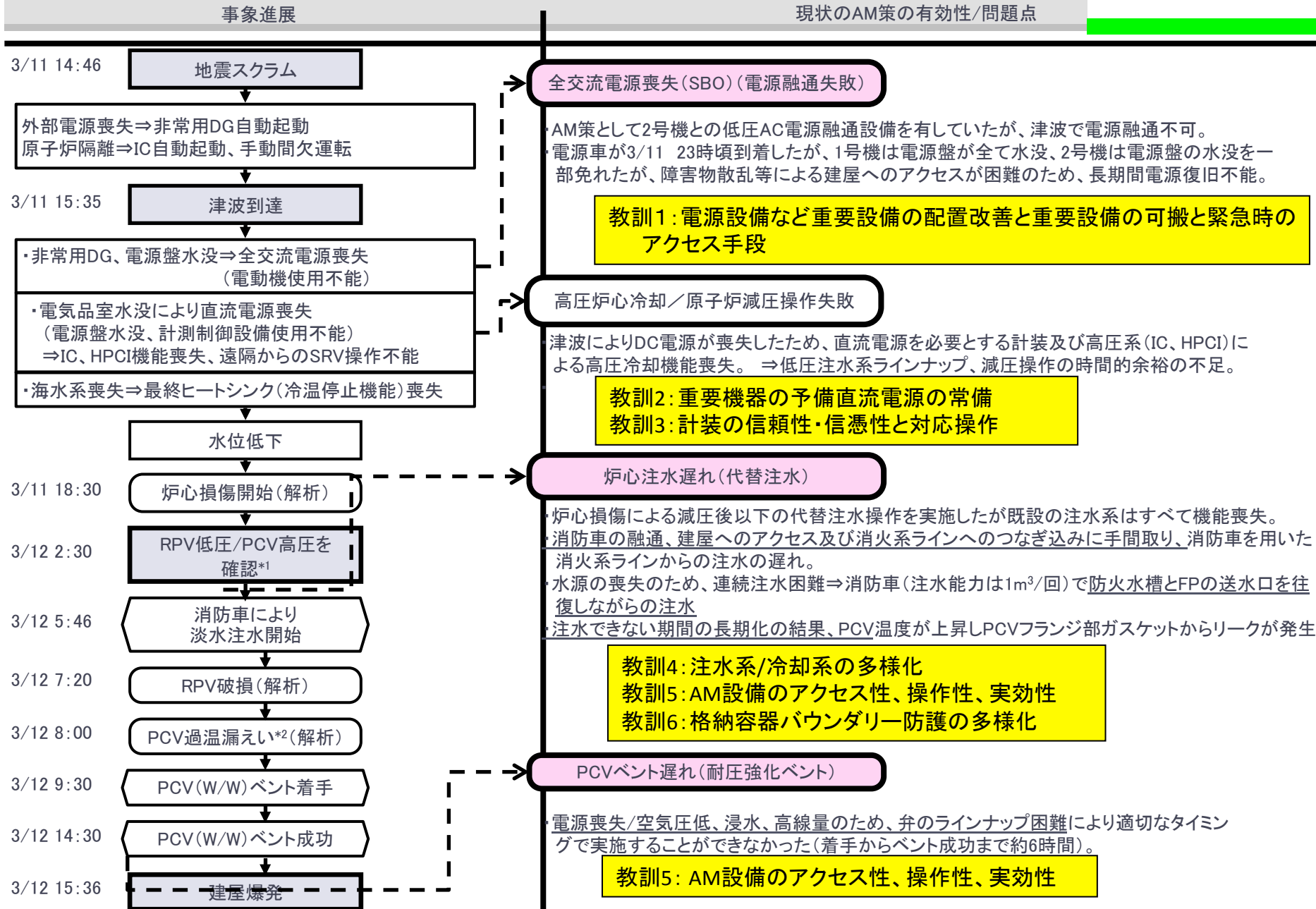
ADS: Automatic Depressurization System  
 CRD: Control Rod Drive  
 HPCI: High Pressure Core Injection  
 CS: Core Spray

IC: Isolation Condenser  
 CCS: Containment Cooling System  
 SHC: Shutdown Heat removal System  
 SBO: Station Black Out  
 SCRAM: Safety Control Rod Axe Man



# 3. 福島事故の教訓

## 3.1. 1F-1の事象進展と現状のAM策の有効性/問題点



# 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

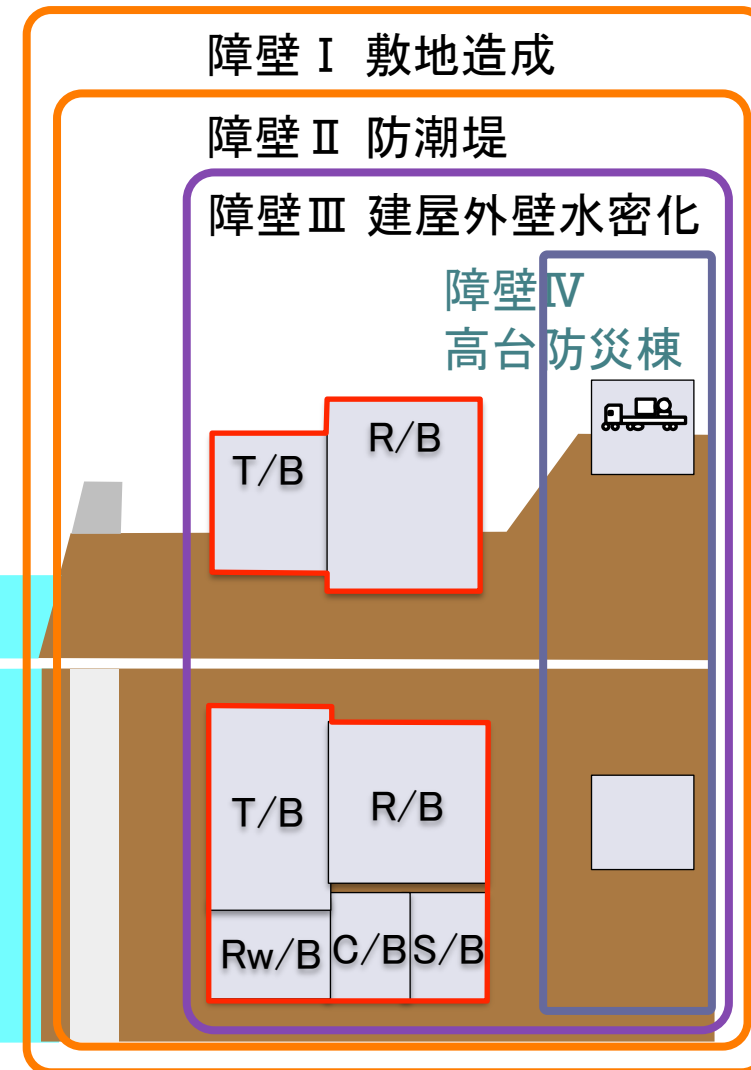
- 津波に対しては、可能な限り高位置に重要機器を配置すること及び水密化は有効
- しかし、給排気口の存在や過大な水撃力により完全な防御は困難



給排気口や扉、貫通口などから浸水の可能性

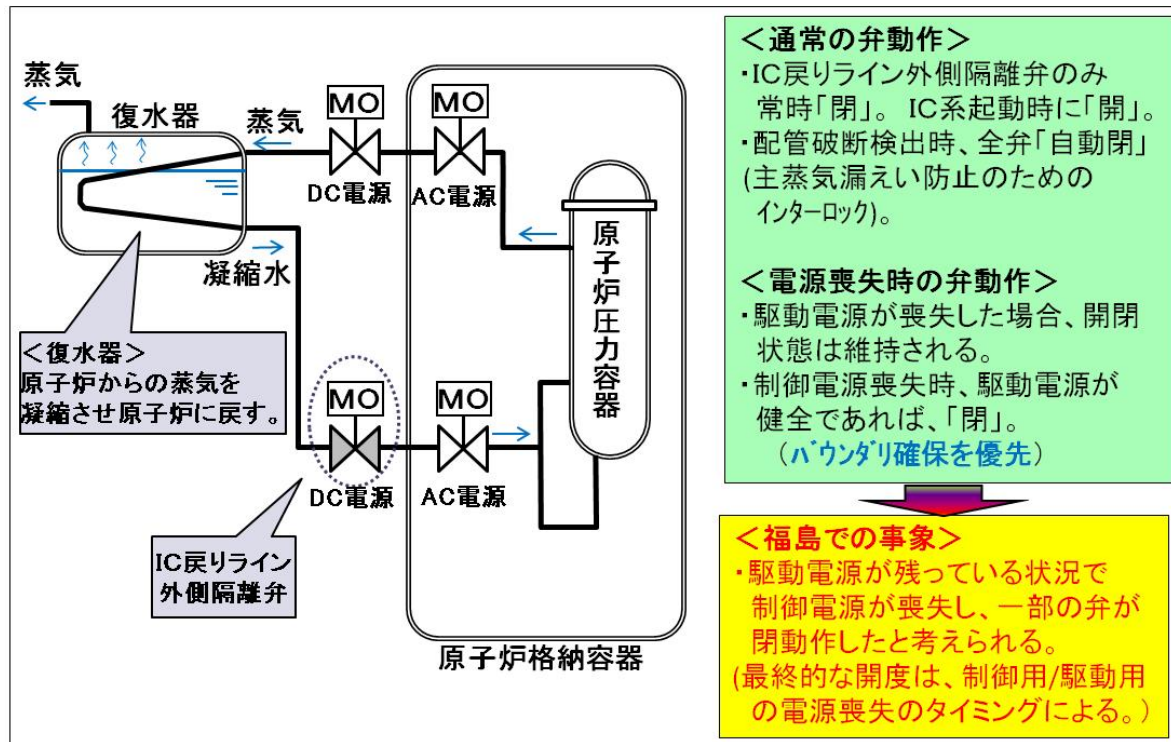


- 想定高さを超えた津波やその他の外部リスクに対しては、別の場所からの可搬もしくは仮設による復旧対策が必要
- 電源車、電源盤、注水系などの高台や防災棟(完全水密建屋など)に常備
- 緊急時のアクセスのために、緊急取り付け口の確保とアクセスルート作成のための重機の常備



## 教訓2: 重要機器の予備直流電源の常備

- 非常用復水器(IC)は原子炉隔離時の冷却設備として設置されており、機能喪失時は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⇒一次系の隔離機能を優先して隔離弁をフェイルクローズに設定
- 過酷事故(SA)までICの機能を期待した場合は、隔離弁のフェイルオープンの選択もあるが、設計基準事故時のバウンダリー機能確保をどのように担保するかが課題
- やはり、ICは原子炉隔離までの機能としてSAでは別途隔離弁を手動もしくは自動開の手段(予備の直流電源の常備)を追加するべきではないか。



### ■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

- DC電源喪失時のバックアップ⇒小容量でも迅速さ
- 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

- 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

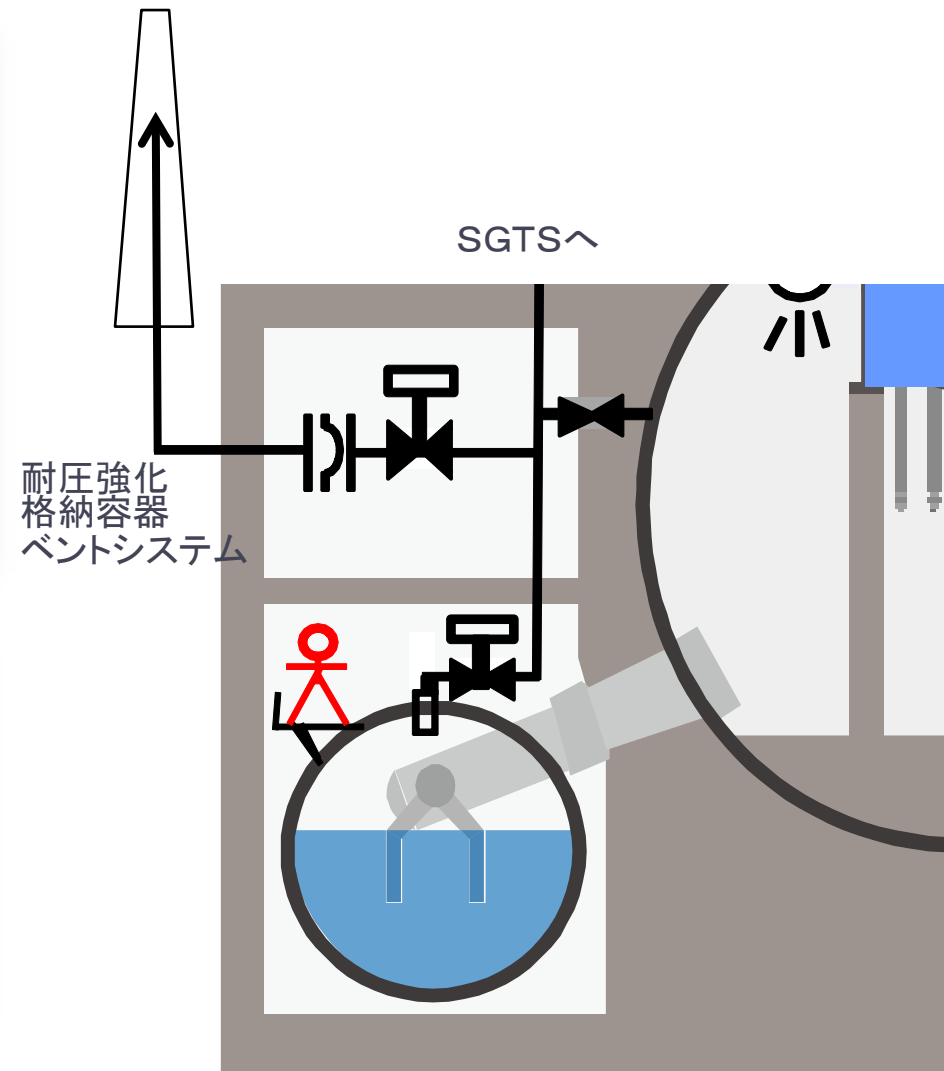
## WWベント弁のアクセス性とラプチャーディスクの問題

### ◆ 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



## ◆アクセス性の改善例

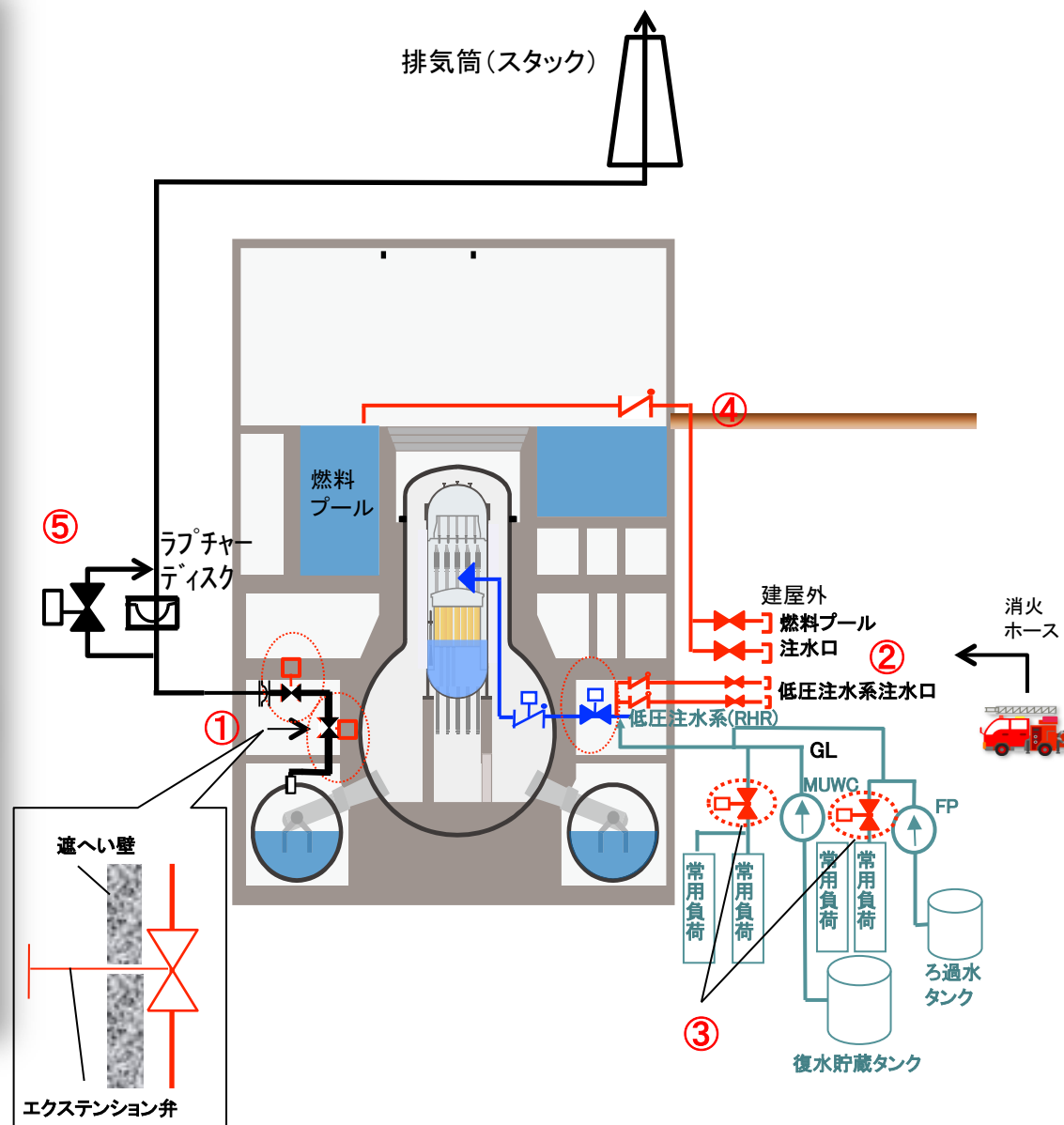
- ① 遠隔手動ハンドルの追加により, 操作時の被曝を低減
- ② 代替注水の注水口の分散配置により, 容易に接続可能な構成

## ◆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

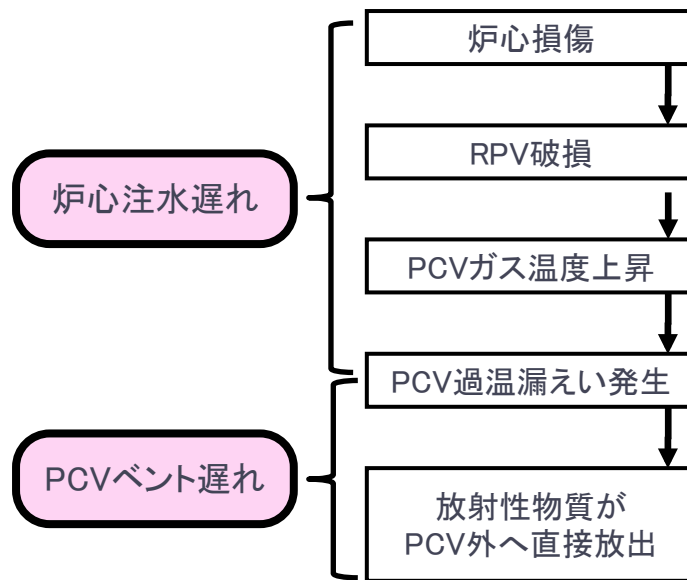
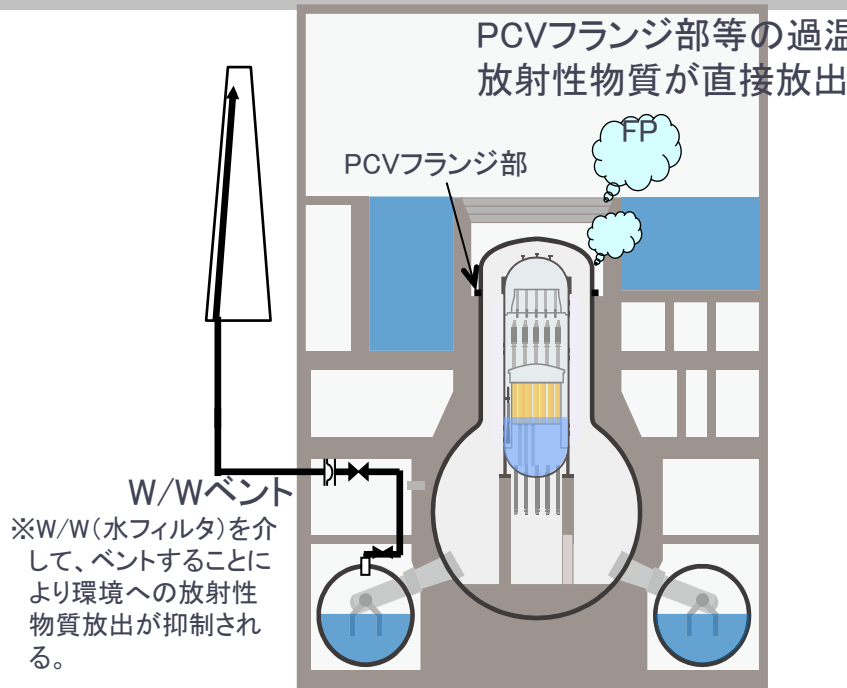
## ◆実行性の改善例

- 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6: 格納容器バウンダリー防護の多様化

## 事象進展

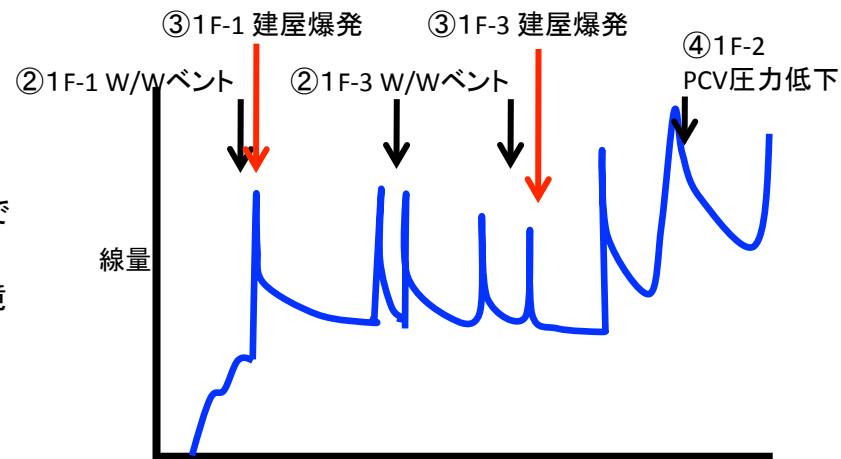


### ● 福島第一サイトのW/Wベントの状況

- 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大
- 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の環境への直接放出

### ● 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



- |                        |                        |  |
|------------------------|------------------------|--|
| 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-1/1F-3建屋爆発及び④1F-2PCV圧力低下以降にバックグラウンドが上昇 |
|------------------------|------------------------|--|



## 4. 今後のあるべき姿

### 自然災害に対する備えの重要性

- 自然の脅威に真正面から立ち向かうことの限界
  - 設計想定を超えた事態に対する対策が重要
  - 設計想定を超えた自然災害はプラント安全設計とは別の防災の「備え」
- 「格納容器の防護」の重要性を再認識
  - 格納容器の過温破損により土壌汚染が発生
  - 格納容器の過温破損を如何にして防ぐかが重要

### 何を為すべきか



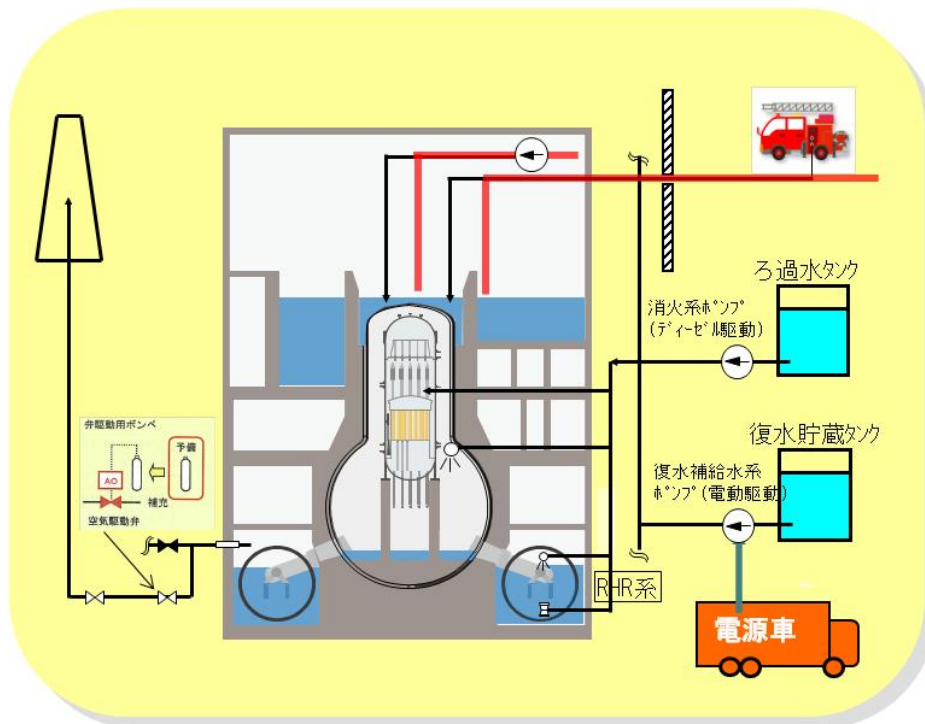
- 「格納容器を守りきる備え」を行政と事業者にて多面的(機材、情報共有体制、連携活動訓練など)に緊急時の手順を整備
- 事態の進展に応じた事業者と行政の適切な連携と対策
  - 3時間\*以内(初動);事業者による炉心損傷防止
  - 1日~3日\*\*以内;事業者による格納容器破損防止
  - 1日~3日\*\*以降;行政/事業者による格納容器破損防止
- AMに適した設備を速やかに導入できる規制環境⇒柔軟な運用ができる可搬や仮設設備の認可

- \* :RPVのインベントリーだけで炉心損傷を防止可能な時間
- \*\* :外部から救援が可能になる時間(サイト条件、インフラに依存)

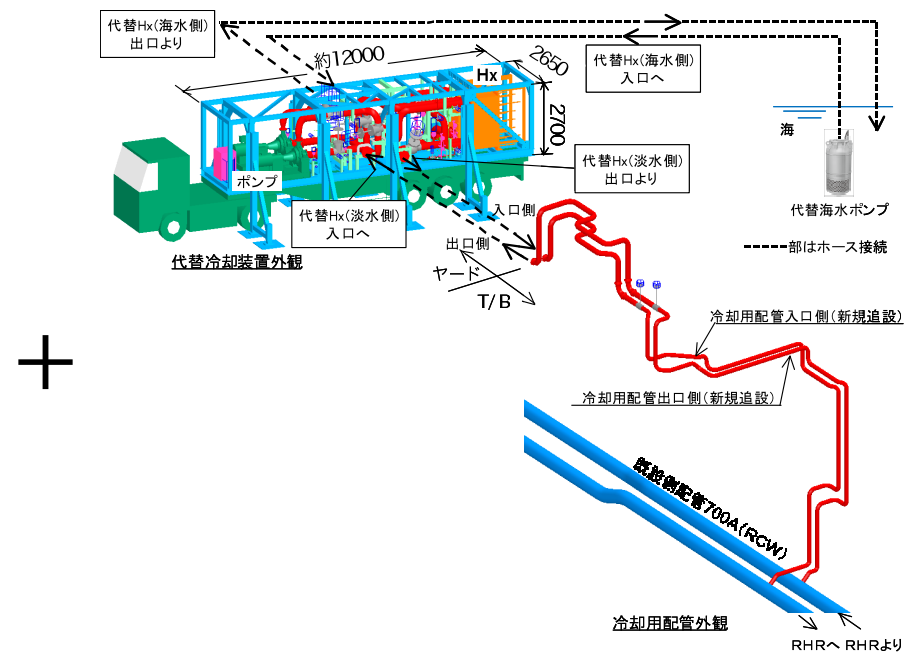
# アクシデント・マネージメントの改善

- 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





## 4. 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。しかしながら、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。

- ◆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