



外的誘因事象への対策

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

2014年8月19日

1. 深層防護の思想とプラント安全設計への適用
2. 福島第一発電所事故で見られた安全設計の課題
3. 外的誘因事象に対する深層防護設計の検討
4. まとめ

- 「深層防護」の思想をプラント設計に適用する際には、適用のシナリオ若しくは適切な設計条件に置き換えるが必要
 - 各層はプラント状態に対応するものであって、各層で期待される対策や設備は当該の運転状態で十分な機能を果たすように設計

- IAEAの提案する5層に基づく、1～3層がプラント設備の設計条件であり、信頼性、運転性、耐力などを適正に確保
 - 多重化、多様化などによる信頼性
 - 自動起動、クイック起動などの運転性
 - 設計マージンによる確実性

- 一方、4～5層は、プラント設備では守りきれなかった万一の事態であるため、AMを主体としてAM遂行のために必要な対策設備が必要
 - 不確かなシナリオでも対応できる柔軟性
 - 迅速かつ的確に実行できる運用性
 - 過酷な環境でも実施可能なアクセス性

1. 1. 内的事象における深層防護の適用事例

- 内的事象に対しては、システムの多重化、多様化、堅牢性を適正に考慮して設計
- 設計設備が万一機能しなかった場合のバックアップとしてAM対策を追加

レベル	運転状態	目的	BWRの設備事例
1	通常運転	異常発生防止	建設、運転、保守での高い信頼性確保
2	予期される運転時の事象	異常の拡大及び事故への進展防止	安全保護系、スクラム、給水制御、RCIC、SRVなど
3	設計基準事故	事故の緩和及び周辺への放射性物質の異常放出防止	ECCS、RHR、ADS、PCV、SGTS、EDG
4	シビアアクシデント	事故の進展防止及びSAの影響緩和	SLC、代替注水系、WWベント、代替電源
5	防災	放射性物質の大規模放出の影響緩和	退避

設備設計
で対応

AMで対応

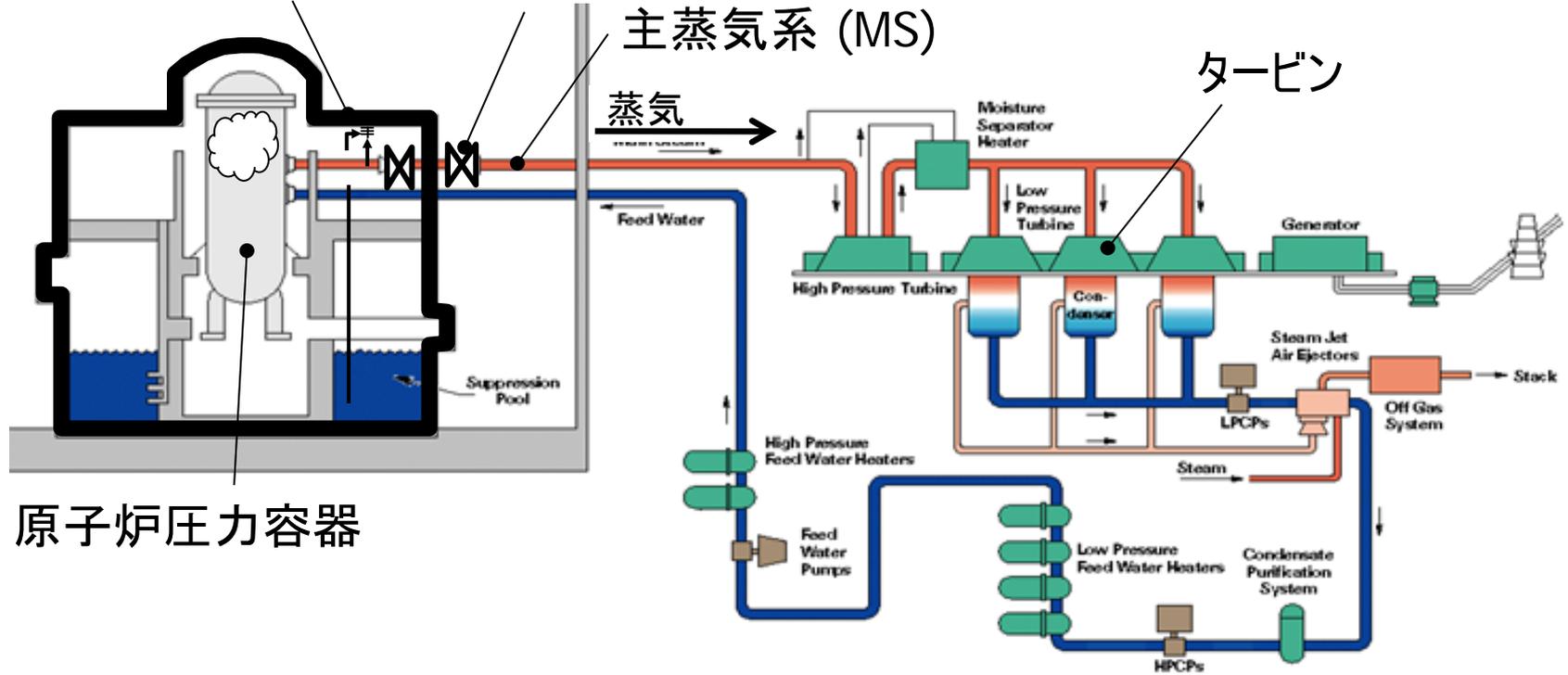
福島第一原子力発電所のプラント設備の概要

		1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
電気出力(万kW)		46.0	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0
営業運転開始		1971/3	1974/7	1976/3	1978/1 0	1978/4	1979/10
原子炉型式		BWR3	BWR4			BWR5	
格納容器型式		マークI				マークII	
炉心燃料集合体数 (本)		400	548	548	548	548	764
冷却 設備	原子炉隔離時	IC(2)	RCIC				
	ECCS	HPCI(1) ADS CS(2)	HPCI(1) ADS CS(2) LPCI(2)			HPCS(1) ADS LPCS(1) LPCI(3)	
地震発生時の状況		定格出力運転中			定期検査中		

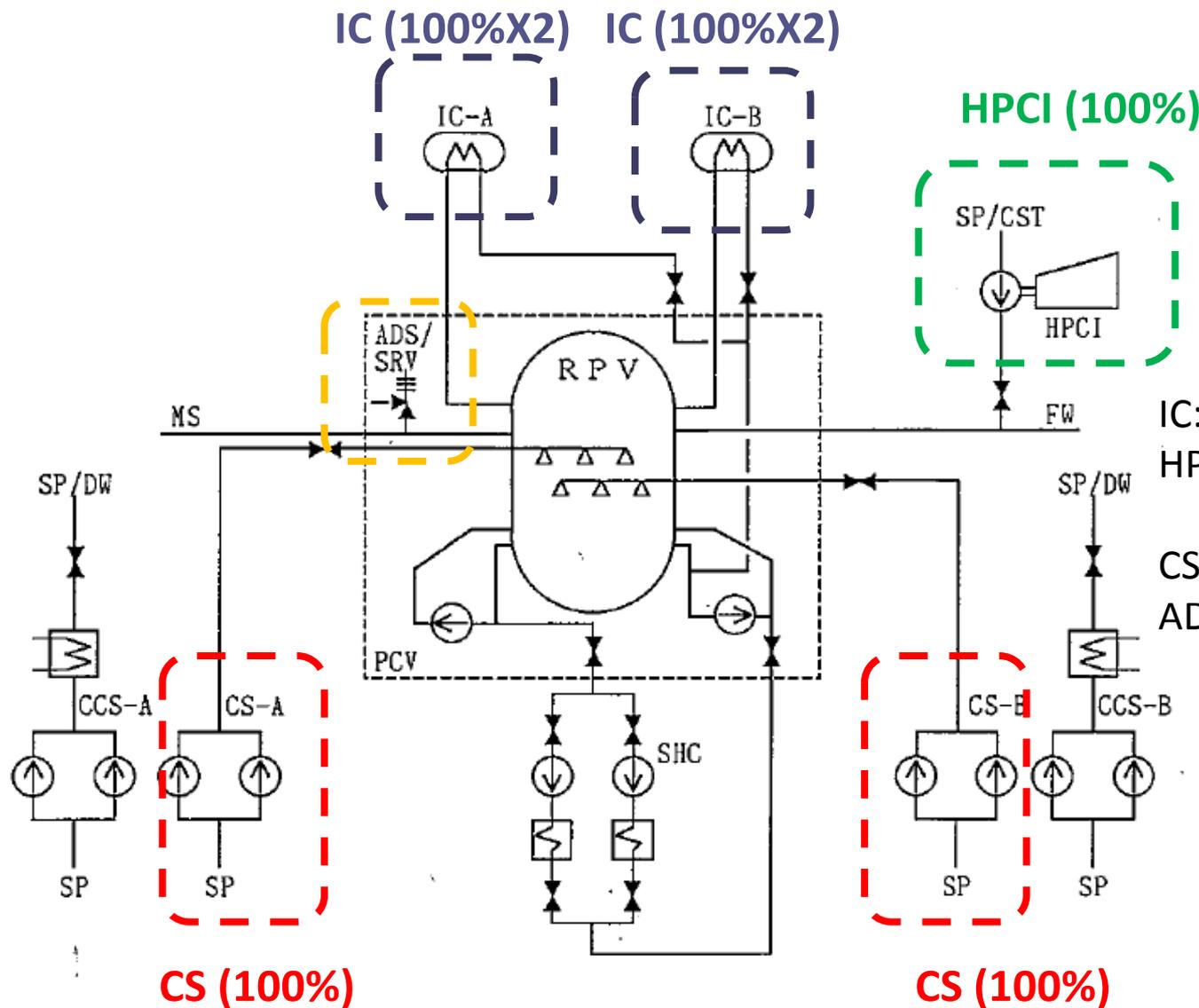
沸騰水型原子炉(BWR)の基本構成

- 原子炉 (約7 MPa)で冷却水を沸騰させて蒸気を発生させ、直接タービンに導いて発電
- 安全設計の基本は、「止める」「冷やす」「閉じ込める」
 - 「止める」: 緊急時に制御棒を挿入して原子炉の反応を停止するスクラム機能
 - 「冷やす」: 原子炉停止後の崩壊熱を除熱する非常用炉心冷却系(ECCS)
 - 「閉じ込め」: 万一の場合でも放射性物質閉じ込めるための原子炉格納容器と隔離弁を設置

原子炉格納容器(PCV) 隔離弁



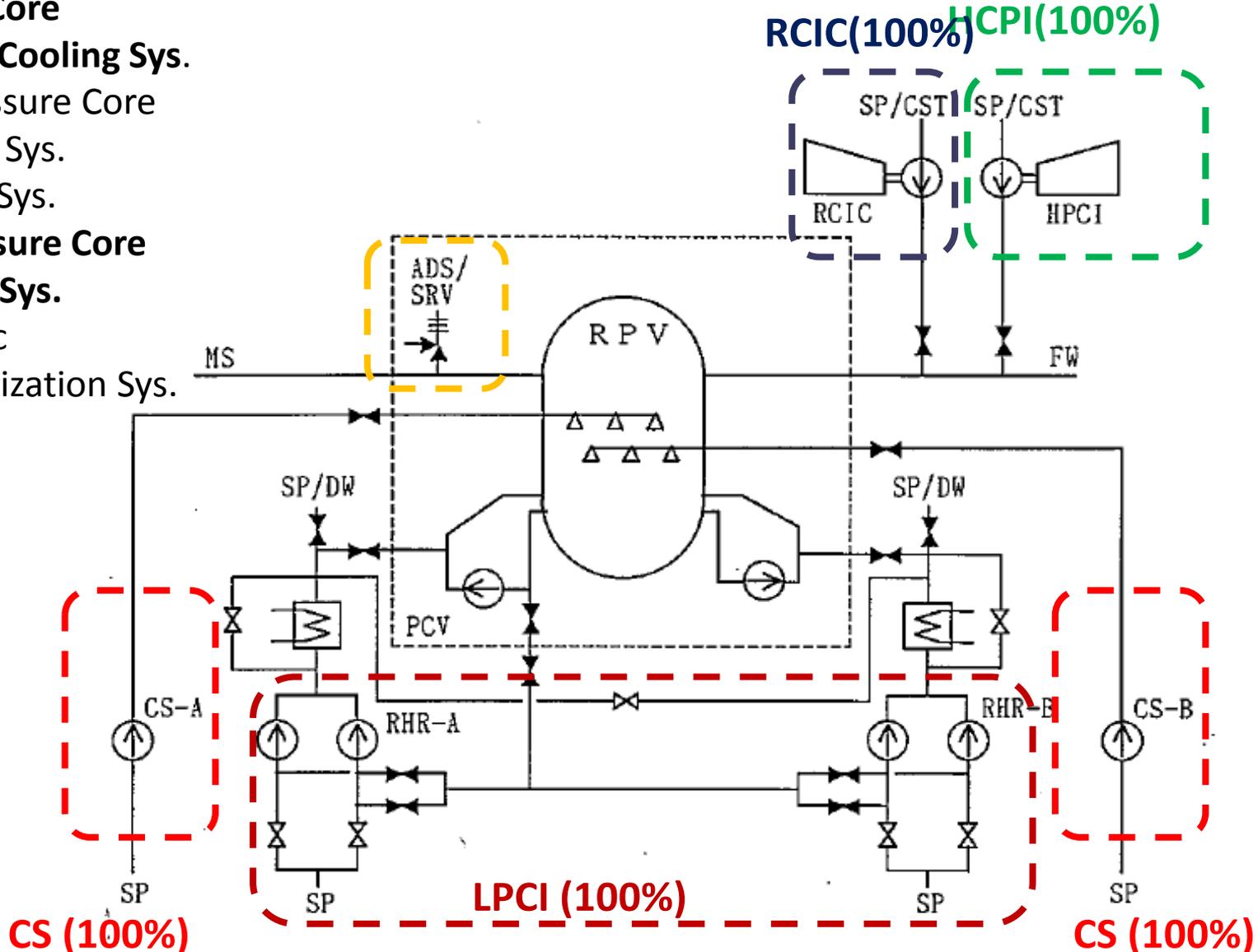
1号機(BWR-3)の注水・冷却設備



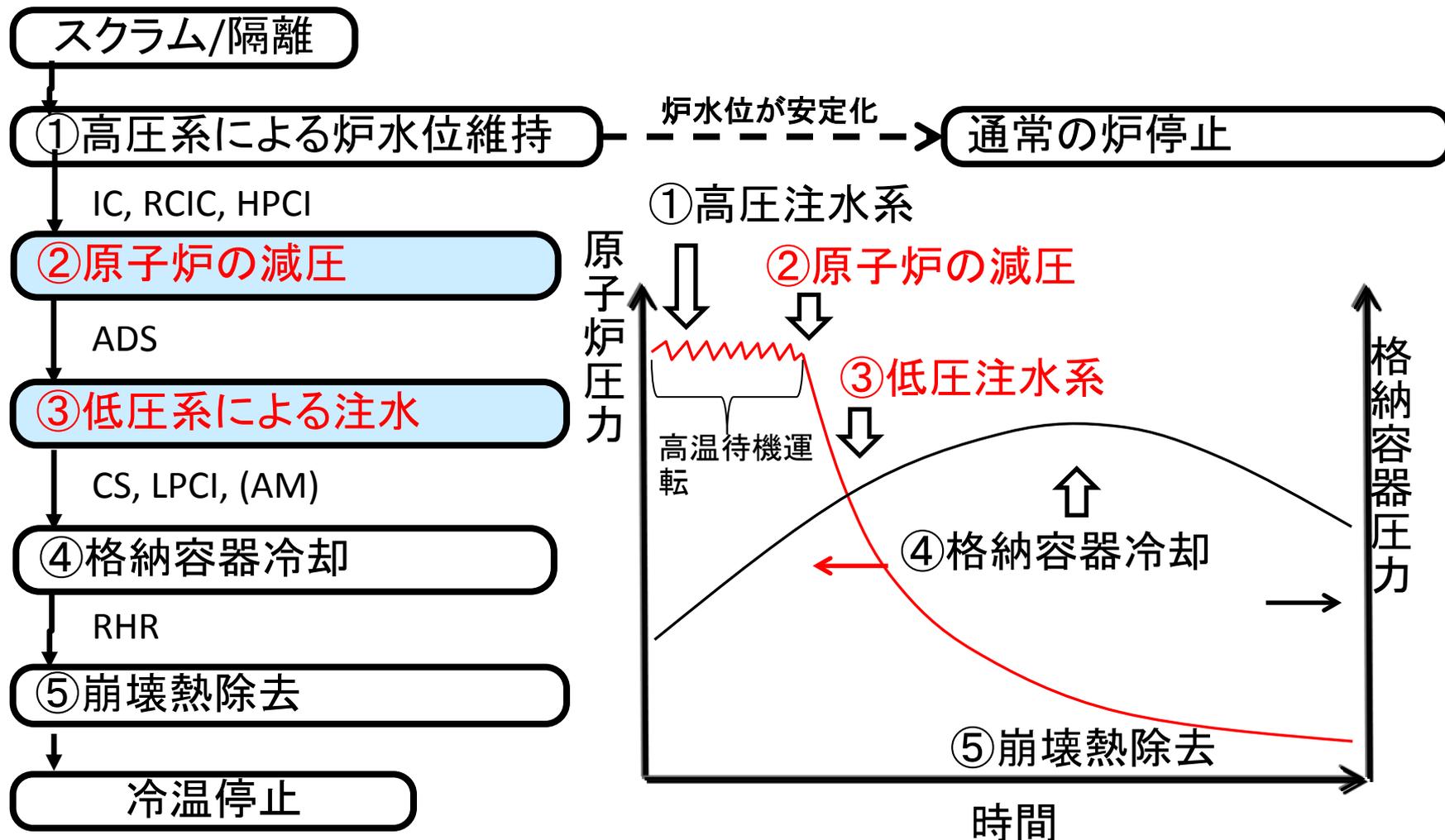
IC: Isolation Condenser
HPCI: High Pressure Core Injection Sys.
CS: Core Spray Sys.
ADS: Automatic Depressurization Sys.

2号機、3号機 (BWR-4) の注水・冷却設備

RCIC: Reactor Core Isolation Cooling Sys.
HPCI: High Pressure Core Injection Sys.
CS: Core Spray Sys.
LPCI: Low Pressure Core Injection Sys.
ADS: Automatic Depressurization Sys.

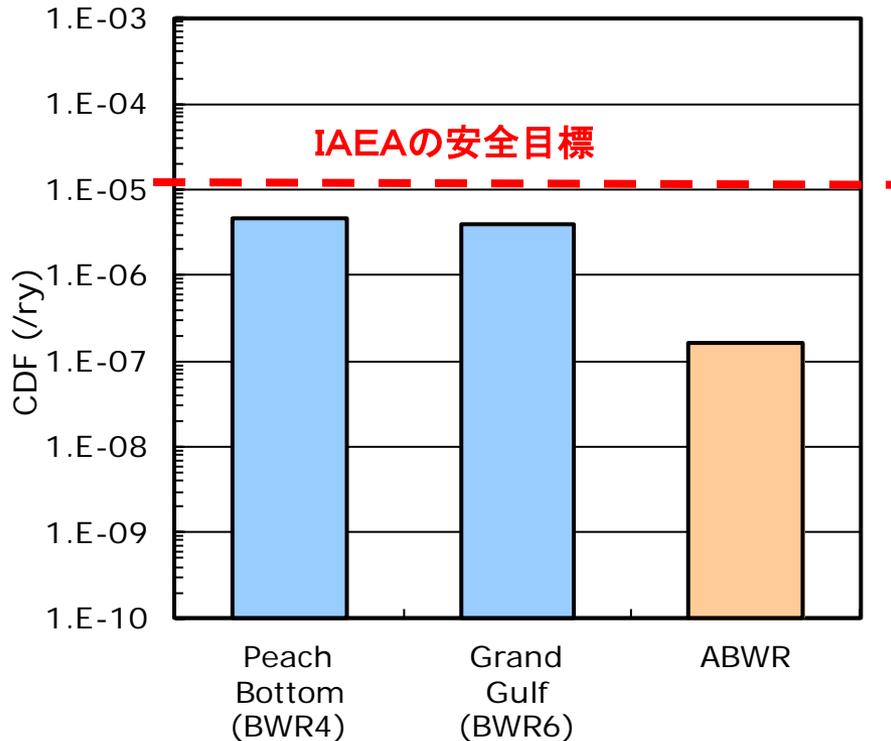


□ BWRは、原子炉システムの圧力状態に応じて、多重かつ多様な注水系を保有

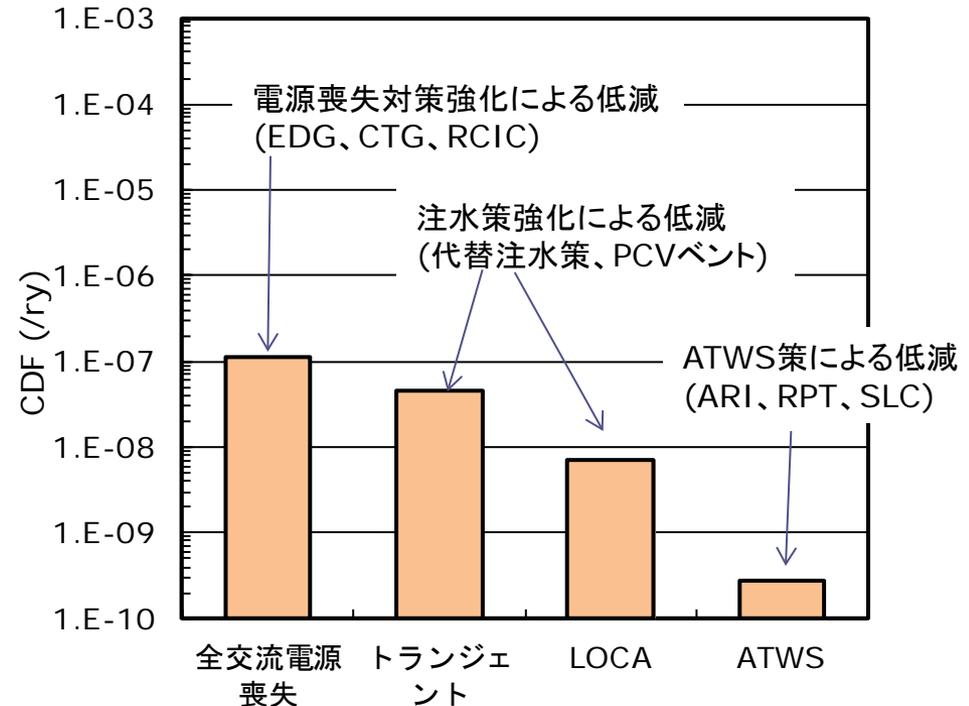


1. 2. 内の事象におけるリスク評価

□内の事象(機器のランダム故障がリスクを支配)に対しては十分なリスク低減



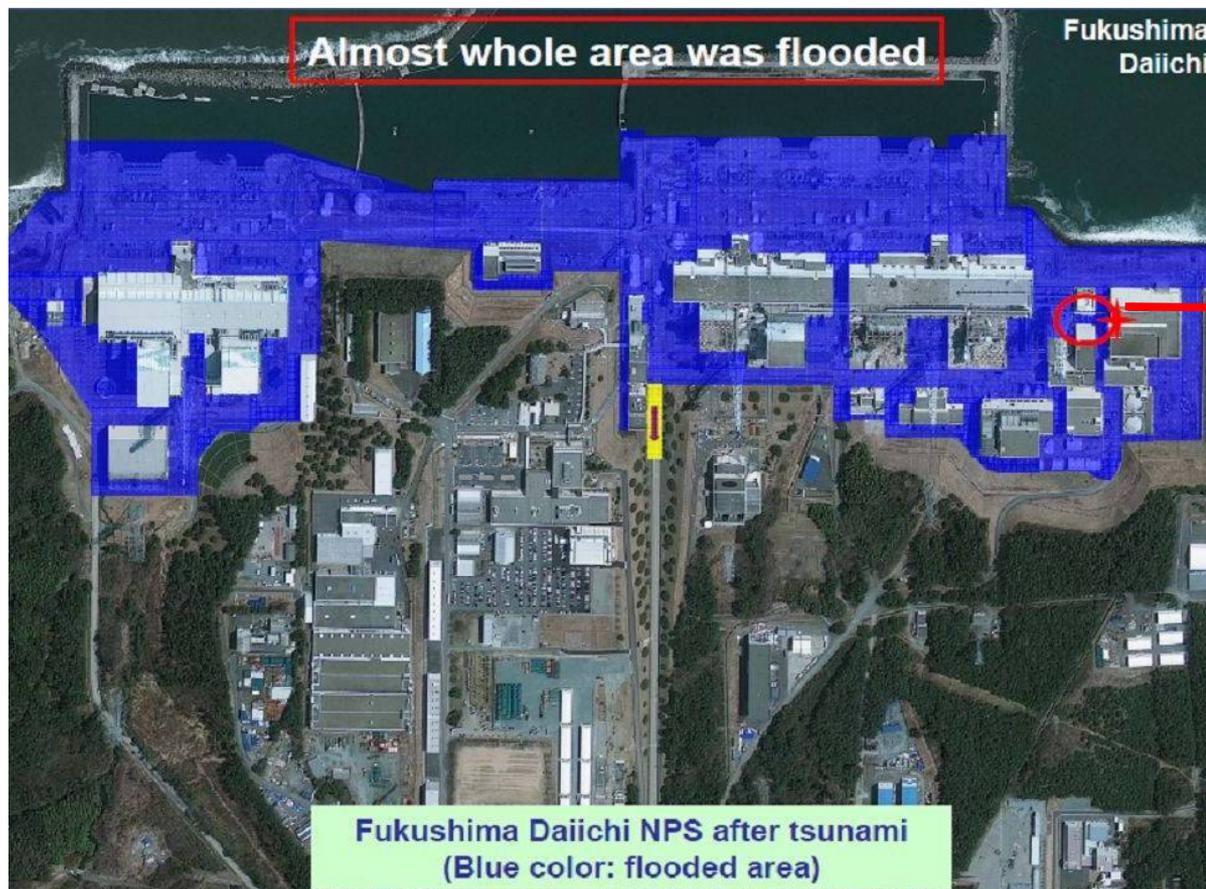
内の事象の炉心損傷頻度



ABWRの炉心損傷頻度の内訳

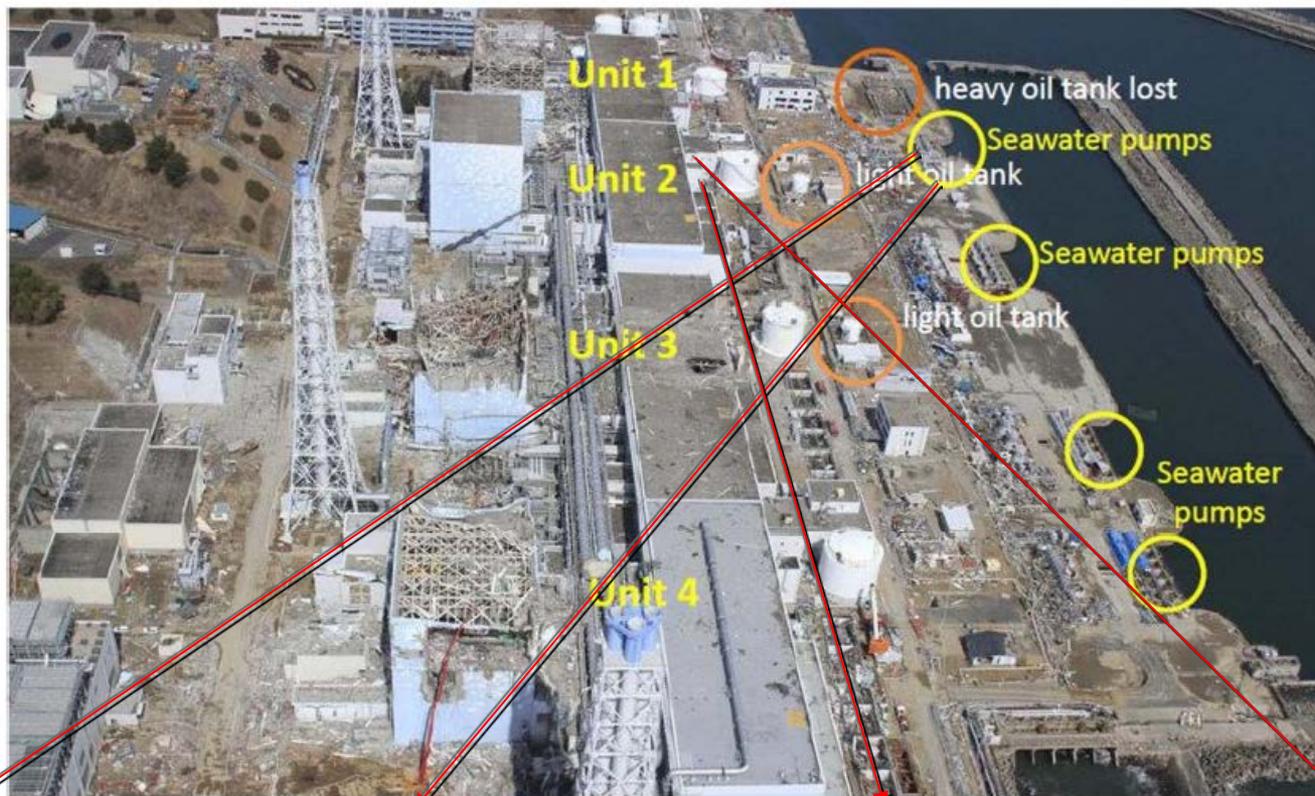
2. 福島第一発電所事故で見られた安全設計の課題

- 福島第一発電所は、津波の襲来までは設計通りに安全が確保（スクラム、隔離時冷却維持、非常用DGの待機など）
- 襲来した津波により、サイト全域が5m規模で浸水し、吸気口或いは破損したシャッター、貫通部から海水が建屋内に浸入し、電気設備や安全上重要なシステムの機能喪失を誘発⇒ **大規模な共通原因故障の誘発**



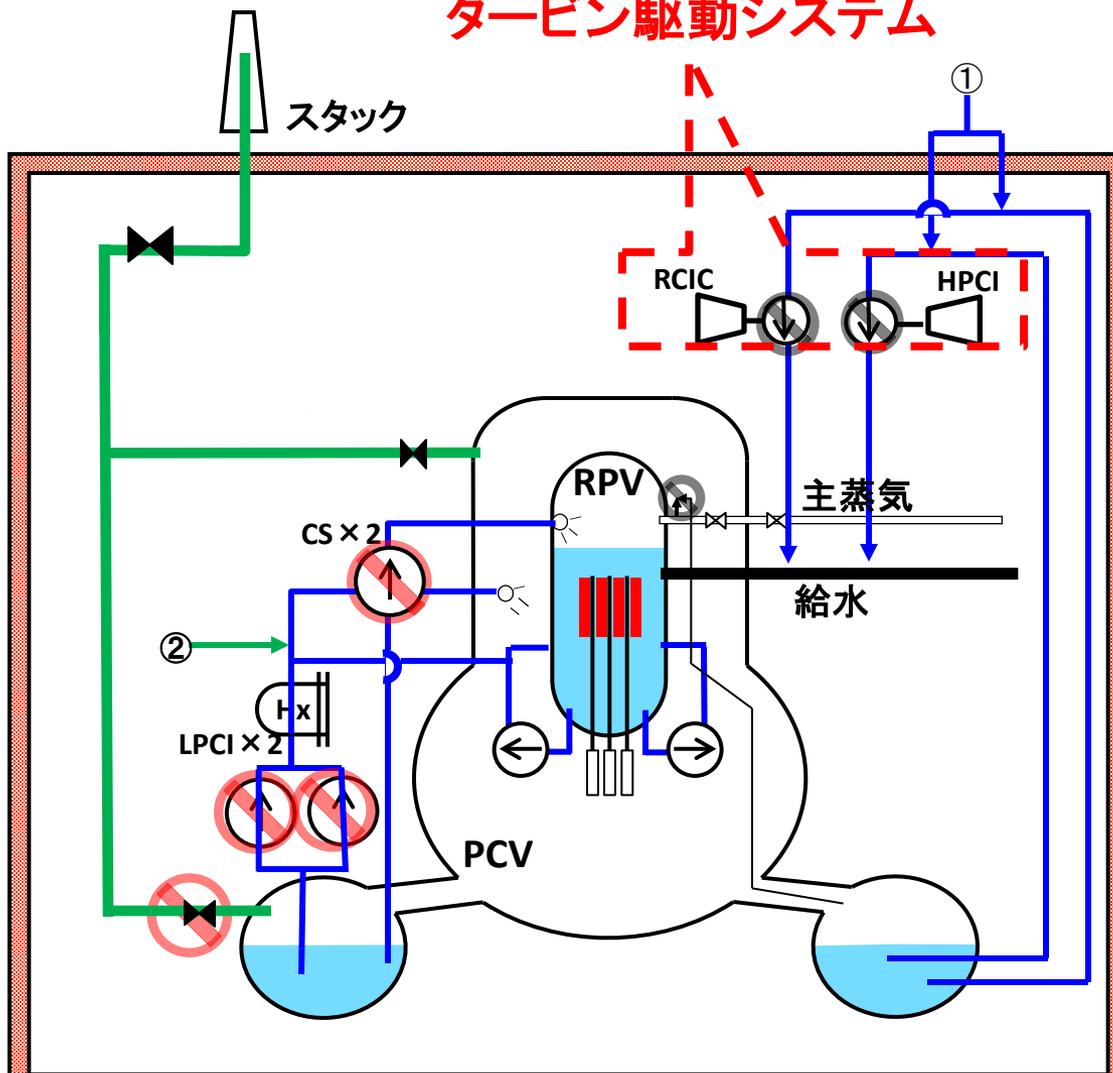
[Reference] The Great Japan Earthquake and Current status of Nuclear Power Station, TEPCO

□サイト内のほぼ全域が壊滅的な損傷を受けたためAMも困難

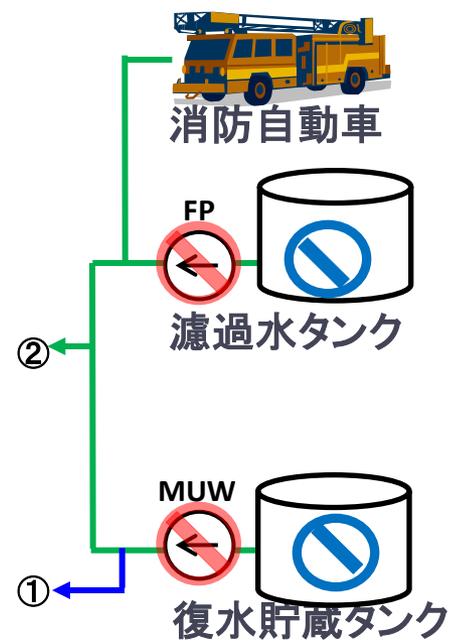


地震と津波により安全系及びAM設備も機能喪失

タービン駆動システム



-  : 直流電源の枯渇で機能喪失
-  : AC電源の喪失で機能喪失
-  : 水源の喪失



- 内的事象と外的誘因事象の深層防護設計の相違
 - 外的誘因事象のリスクは、機器のランダム故障に支配されているのではなく、その発生頻度と災害のレベルで支配(ストレステスト的)
 - 設計の想定を超えた瞬間に共通原因故障を誘発(安全レベルは設備の多重化に比例しない)
- 外的誘因事象に対する防護レベルの設定の難しさ
 - 防護レベルの設定(歴史的な経験データによる設定、テロの想定など)
 - 複合的な被害の想定(地震に伴う津波、航空機衝突に伴う燃料火災など)
 - プラントへの被害の程度、範囲の想定(建屋・建造物の崩壊や変形、漂流物による衝突など)
- プラント全体或いはサイト全体の被災によるAM実行上の困難さ
 - 共通原因故障を想定したAMは複合的(SBO+LUHなど)
 - アクセスやコミュニケーションの問題(瓦礫、障害物、火災など)



- 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？
 - 位置的な分散と多様化(プラント外部からのAM)
 - 想定外の事態に対する体制と教育・訓練(特に、有能な指揮官の育成)

3.1. 外的誘因事象に対する深層防護設計の考え方

□外的誘因事象に対しても、レベル3まではプラント施設の設備設計で対応

- 地震に対しては、設計基準地震動に応じた設備の強度設計
- 津波に対しては、設計津波高さに応じた津波対策
- テロによる航空機衝突に対しては、配置や壁厚で対応

□レベル4以降は、各々の外的事象の性を勘案してサイト内外からのAMで対応

- 可搬式代替設備や支援設備を用いたプラント外からの救援
- 国や支援機関を含めた戦略的な運用体制(サイト内～サイト外AM)

レベル	運転状態	地震に対する対策	津波に対する対策
1	通常運転	耐震クラスに基づく設計	敷地造成
2	予期される運転時の事象		防潮堤 プラント配置
3	設計基準事故		建屋外の水密化 建屋内水密区画 機器配置
4	シビアアクシデント	サイト内AM(可搬式代替設備、防災棟)	AMで対応
5	防災	サイト外AM(可搬式代替設備)	

設備設計
で対応

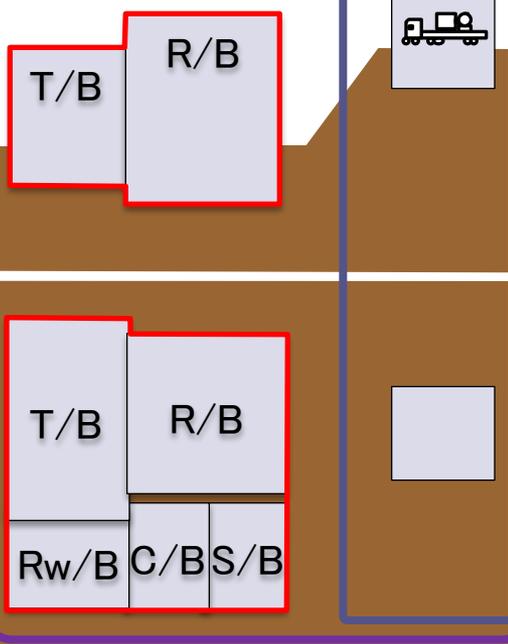
AMで対応

障壁Ⅰ 敷地造成

障壁Ⅱ 防潮堤

障壁Ⅲ 建屋外壁水密化

障壁Ⅳ
高台 防災棟



基本条件: 津波高さ・敷地形状

障壁Ⅰ,Ⅱ [敷地高さによる対策設計]

敷地面レベルによる浸水防止

防潮堤による浸水防止

障壁Ⅲ [重要機器浸水防止対策設計]

建屋外壁水密化による浸水防止

障壁Ⅳ [設計条件を越えた場合の対策]

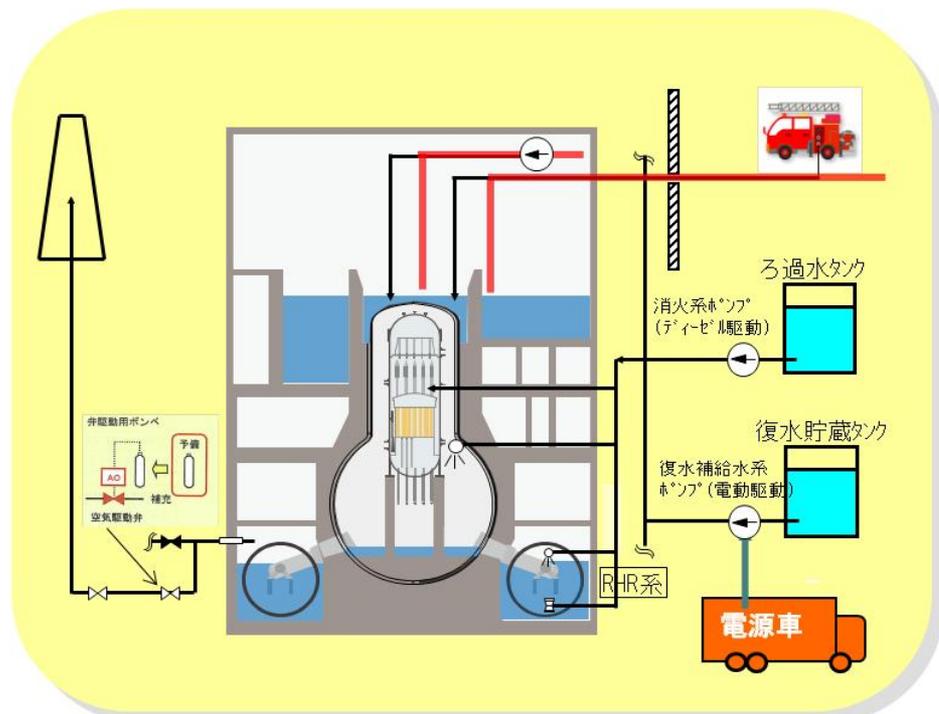
建屋内に浸水した場合には, 高台に
設置の防災棟により対応

3. 2. 外的誘因事象に対して有効なAM手段

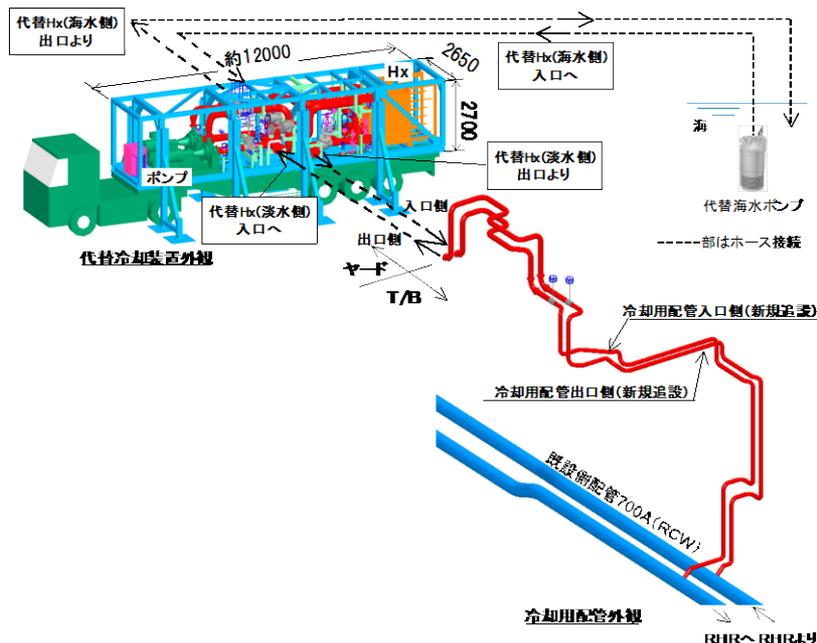
□設計基準事故を越えた事故に対しては、これまでのAMを実行性のあるものに改善することが重要

□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

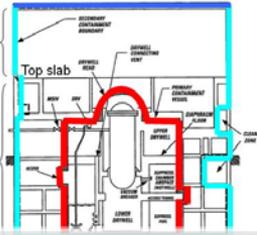


プラント外からの救援体制

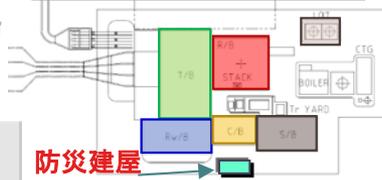


サイト内のAMの拠点化整備

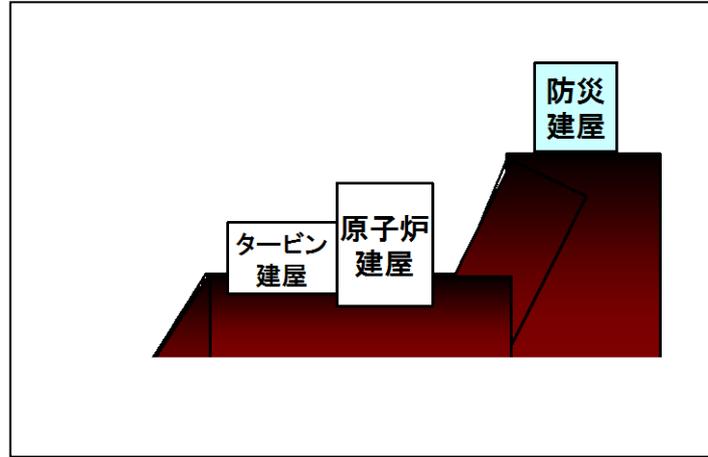
- ▶ 津波対策
- ▶ 海外規制対応: 航空機衝突・火災防護対策



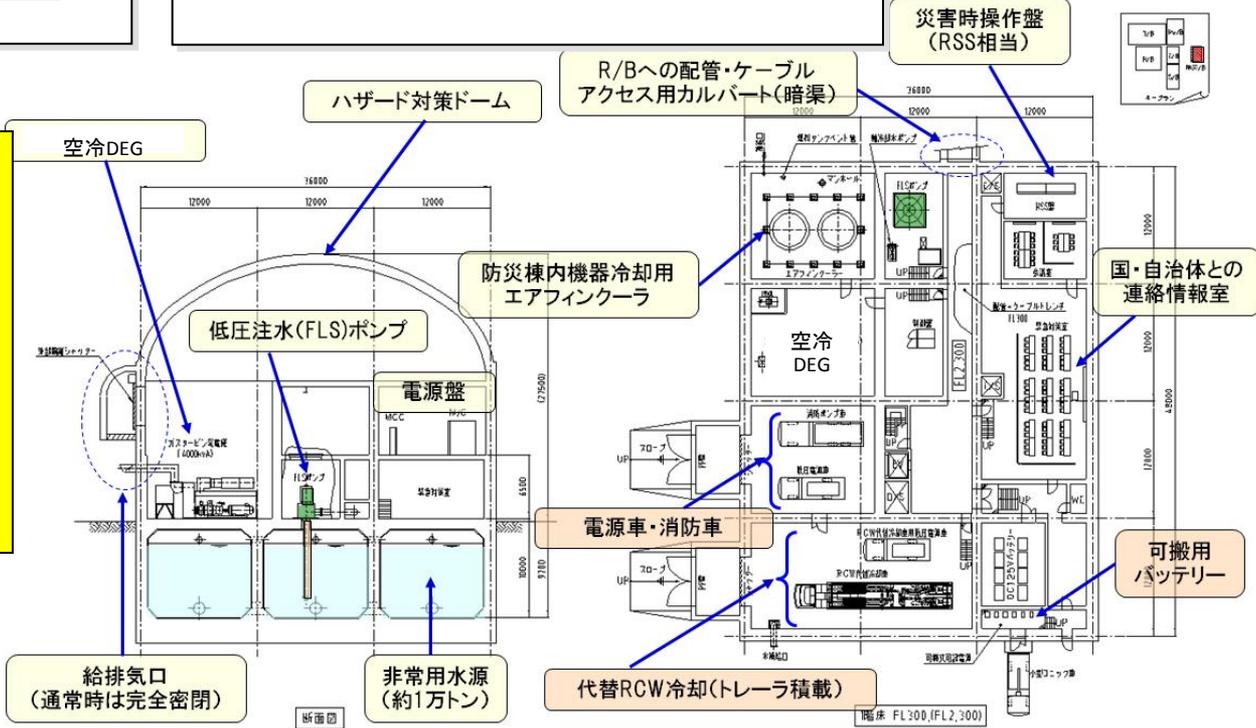
・SA専用設備を防災建屋に配備



- ・建屋内分離配置
- ・壁厚による防護

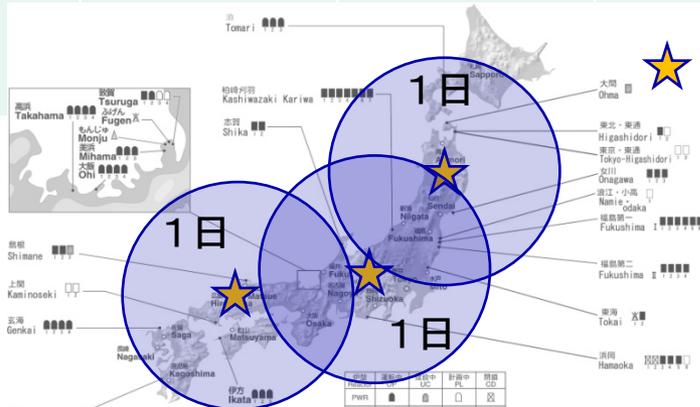


□ 如何なる災害においても最後まで機能を保持する防災建屋(通常時開口部無しなど)
□ AMに必要な予備品などの保管
□ 災害時の前線基地



安全確保のための戦略的展開の考え方

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	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

米国産業界の福島対策の対応案

米国NEIによるFLEXプログラムにおいても可搬式の設備を用いたプラント外部からの支援体制を構築する安全対策を提案

MAKING SAFE NUCLEAR ENERGY SAFER AFTER FUKUSHIMA

FLEX is a flexible and diverse strategy developed by the nuclear energy industry to quickly and effectively implement the Nuclear Regulatory Commission (NRC's) Fukushima task force recommendations. The FLEX protection strategy addresses the main safety challenges at Fukushima—the loss of cooling capability and electrical power resulting from a severe natural event that exceeded the plant's design basis—to make U.S. facilities even safer. It builds on safety steps taken by industry during the past three decades by providing a fast, effective and efficient way to apply the lessons learned from Japan's experience.

MULTIPLE LAYERS OF POWER SUPPLY

Backup generators provide reliable electrical power and cooling capability if an extreme event disables the normal plant equipment. Additional battery banks provide electrical power and cooling capability if an extreme event disrupts regular and other backup power supply.



Diesel Generators
Minimum of two at each reactor

Battery Bank
Additional batteries added in 1998

Dedicated Backup Power from Another Plant

Portable Backup Generators
Added in 2002 and more are being added now

可搬式DGセット

ADDITIONAL SPENT FUEL MONITORING

Additional equipment in spent fuel storage pools will provide another layer of monitoring to ensure temperature and water levels are maintained.



ADDITIONAL PUMPS

To ensure cooling procedures are maintained during and after an extreme event, additional pumps can supply water where needed.



可搬式ポンプ

PREPARING OUR PEOPLE

Nuclear plant and emergency response workers will use the FLEX approach to support key safety functions across multiple reactors. Capabilities and training will be verified for nuclear plant workers to assure the continued viability and reliability of equipment. Communications capabilities will be expanded to include satellite phones and equipment to connect personnel at the plant with government emergency communications networks. Specific strategies include the following:

<p>Enhanced Training</p> 	<p>Expanded Maintenance and Testing of Equipment</p> 	<p>Satellite Communications</p> 
---	---	--

REGIONAL CENTERS

Additional emergency equipment will be stationed in off-site support centers to provide another layer of safety and ensure prolonged reliable operation.



プラント外部に分散配置

PUBLIC OPINION **74%** of Americans believe that U.S. nuclear power plants are safe and secure

80% of Americans believe U.S. nuclear power plants have been made safer as we've learned from experience and added technology

© 2012 Nuclear Energy Institute

米国原子力エネルギー協会 (NEI) によるFLEXプログラム

レベル3までの安全設計思想とは異なる要件を考慮

□機動性

- 想定される最悪の条件下で所定の時間内に必要な機能を果たす機動性
 - 特に、早期(初動)対応に必要なとされる機動性を優先(保守性を排して小型軽量化)

□運用性(操作性)

- 想定される最悪の条件下で必要な時間で操作できる運用性(操作性)
 - 容易なアクセス、簡単な操作

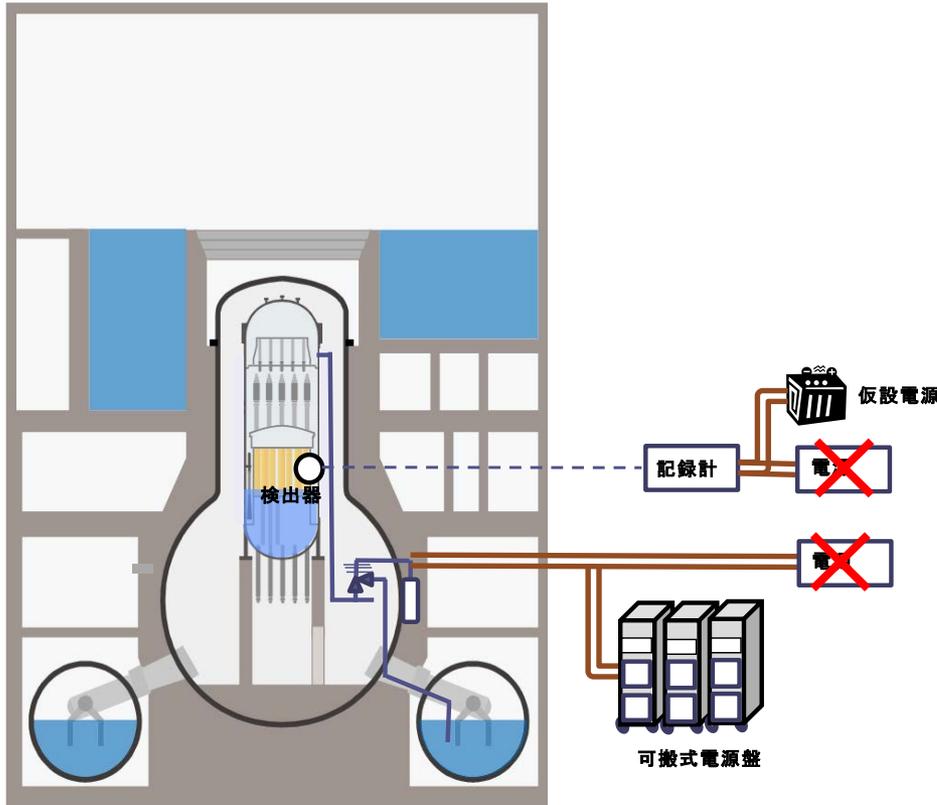
□柔軟性

- 状況の刻々の変化に対して臨機応変の対応ができる柔軟性
 - 外部注水ラインの多様化と運用方法の整備
 - 恒設、仮設、可搬式など運用手段の多様化

機動性の事例検討

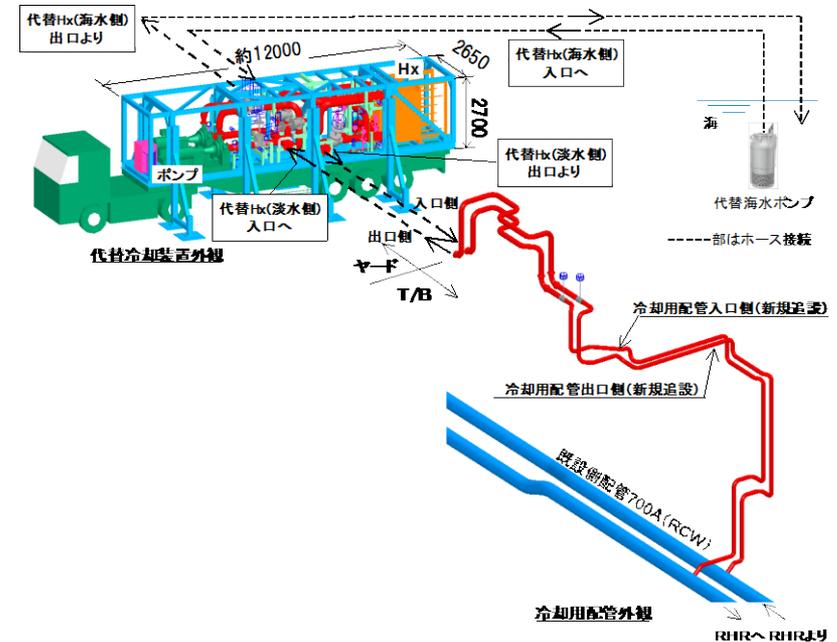
■可搬式のDC電源容量をどのように決めるべきか？

- 先ずは初動に必要な容量
- 長時間の対応に必要な大容量は、別途搬入



■可搬式のRHRの容量をどのように決めるべきか？

- 先ずは迅速に可搬できる容量
- 不足容量によって生じる事態の把握と対応⇒可搬式RHRの接続台数と運用



◆アクセス性の改善例

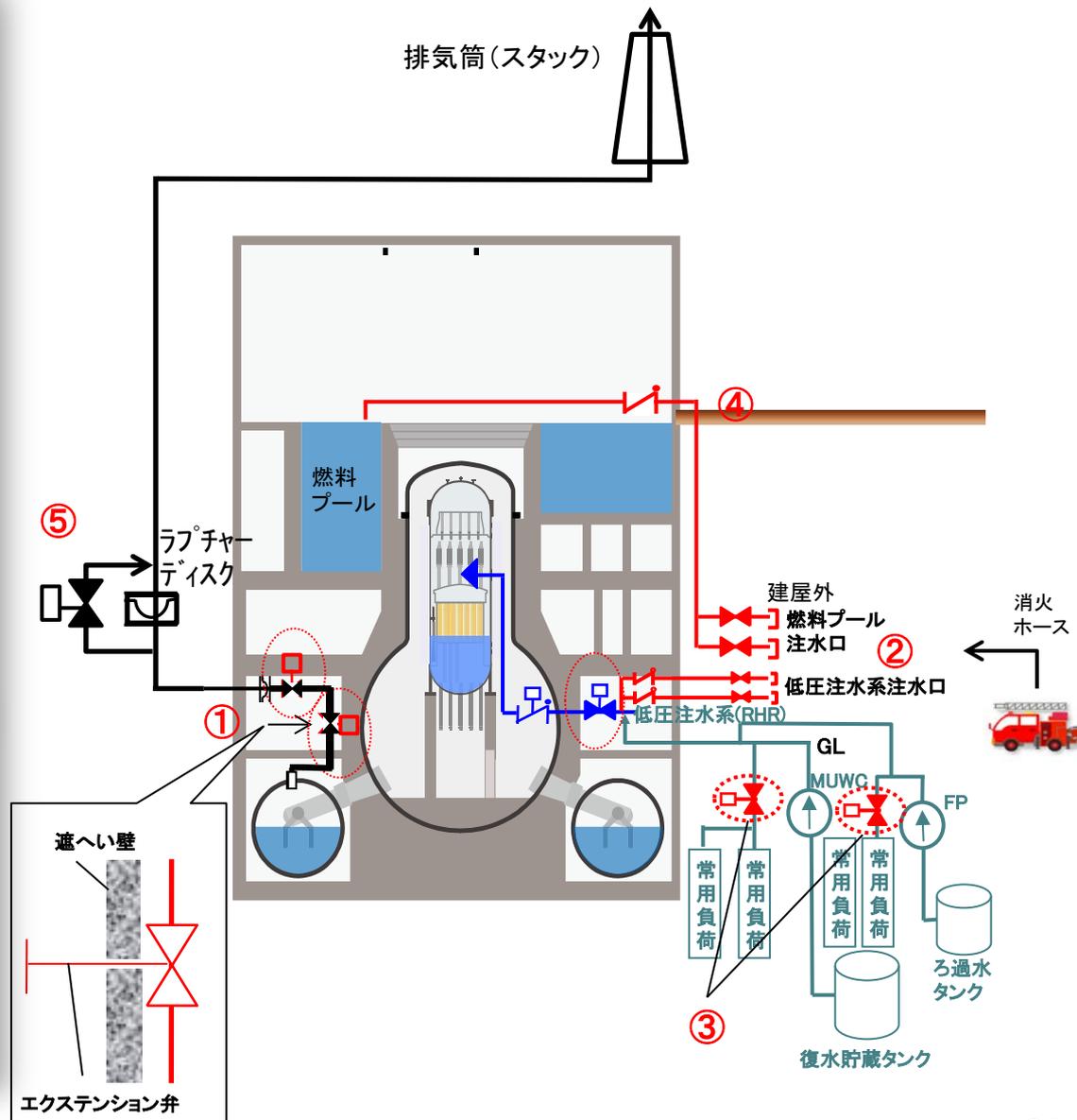
- ① 遠隔手動ハンドルの追加により、操作時の被曝を低減
- ② 代替注水の注水口の分散配置により、容易に接続可能な構成

◆操作性の改善例

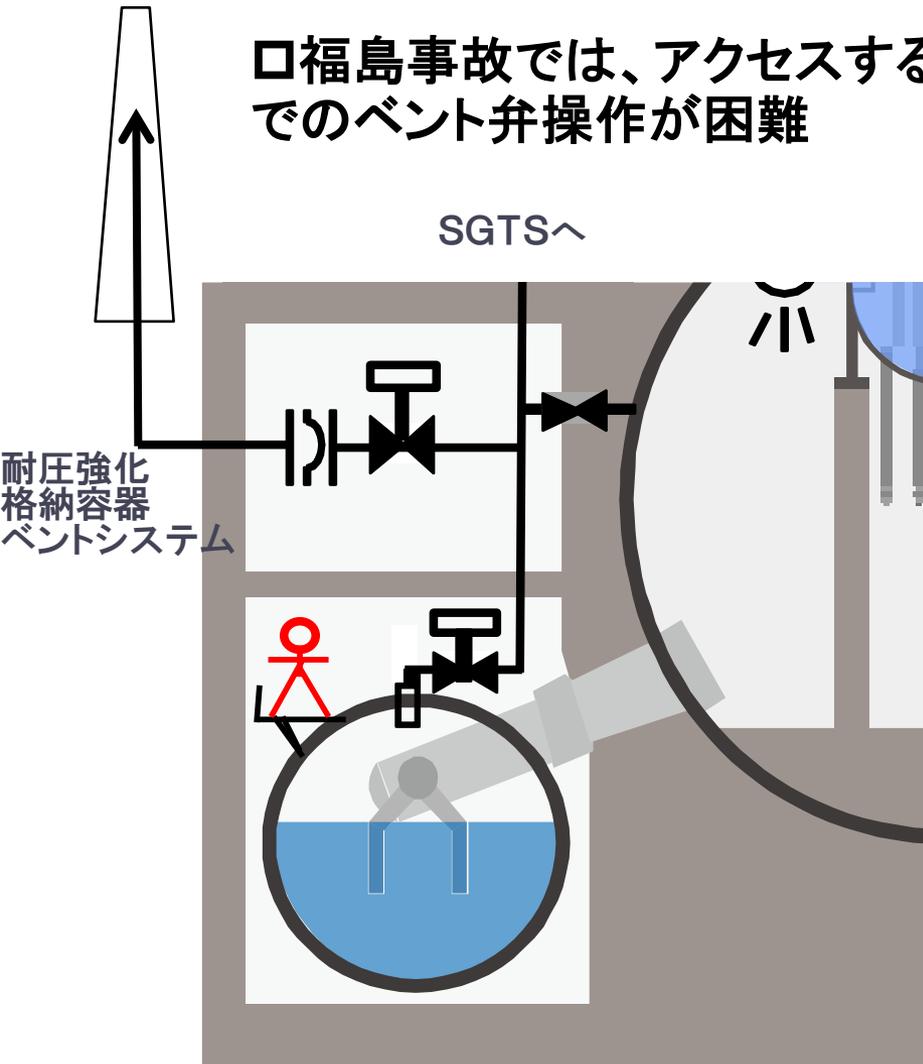
- ③ 常用負荷への隔離弁追設により、容易にバイパス対策可能な構成
- ④ 燃料プールへの代替注水専用ライン追設により、容易に注水可能な構成

◆実行性の改善例

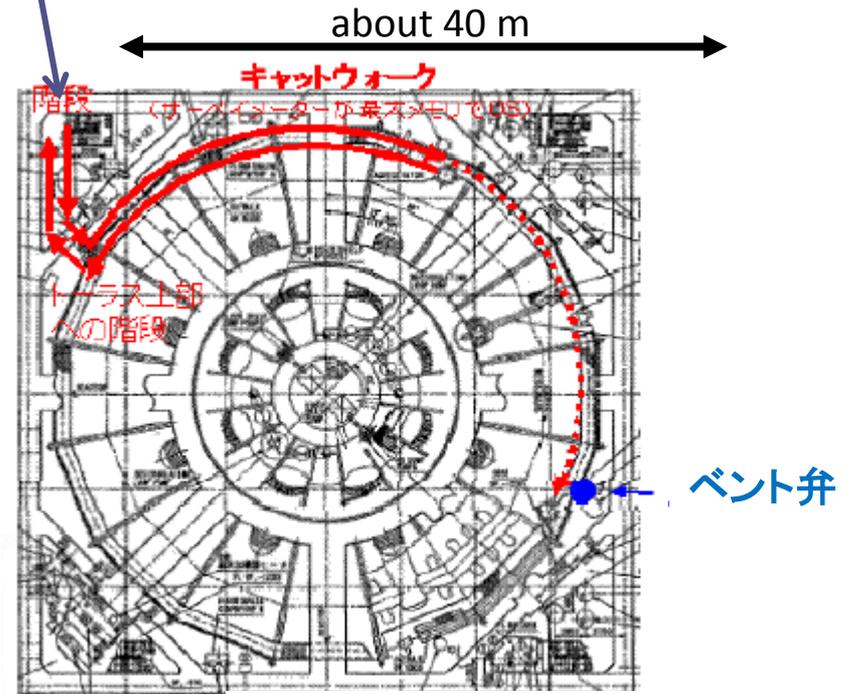
- ⑤ ラプチャーディスクをバイパス可能な構成もしくはラプチャーディスクの削除



福島事故では、アクセスするまでの距離と周辺環境の問題から手動でのベント弁操作が困難



入り口



Underground Floor

事故の進展に応じた柔軟性のある対応の検討（長期SBOの例）



AMで最も重要なことは、設備を運用する人間

□「想定外」を想定する想像力

設計の想定を越えた事態では、限られた情報から事態を的確に推定するための想像力を以下の研究を通して涵養

- 過酷事故に関する研究
- 福島事故を含むトラブル、事故の研究
- 他産業でのトラブル、事故の研究

□全体を俯瞰して適切な判断を導きだす構想力

次に何が起こるか、何をすべきかをプラント全体を俯瞰して適切な判断を導きだす構想力を以下の研究を通して涵養

- PRA研究

□躊躇わない決断力

異常な環境下で意思決定をするための決断力を涵養

- 教育・訓練

□内的事象に対しては、安全設備の多重化、多様化、堅牢化に加えてAM設備の導入により、十分なリスク低減を達成(更なるリスク低減努力を今後も実施)

□一方、自然災害などの外的誘因事象では、内的事象とは異なるプラント設備の大規模な共通原因故障の誘発や事象の想定の高難性という問題が存在

□従って、福島第一発電所での事故の教訓に基づくと、外的誘因事象に対してはAM設備の位置的分散、多様化が重要であり、サイト内外から多層のAM体制を構築することが重要

- 恒設・可搬式の代替設備や支援設備の運用方法、アクセス性への対応
- 国を含めた外的事象に対する戦略的な運用体制

□万一の事態で適切なAMを実施するための人材育成と体制の確立が最も重要