

福島第一発電所 事故原因と対策の状況

対話 in 長岡科学技術大学

H25. 6. 12

上田 隆

はじめに

- 福島原子力発電所事故
 - 原子力史上最大級の事故
 - 多くの調査報告書や対策
- 膨大かつあらゆる面で現在も継続中
- 今回の説明
 - 主に技術的側面について
 - 1. 事故原因、2. 対策 の状況 および
「見方」、「考え方」を多少

1. 事故原因

(目次)

- 事故の経緯(1)、(2)、(3)
- 事故原因
 - 直接的原因;それがあれば、なければ・・・
 - 間接的原因;原因の性格← *
 - 根本的原因;体制、体質

(原因究明は完全には終わっていない)

- 今後の課題
 - 規制委員会事故原因調査

東電福島第一発電所事故(1)

何故起こったのか、何故防げなかったのか

2011年3月11日 14時46分 M9.0の地震発生

地震を感知し1、2、3号機とも直ちに制御棒が自動挿入され、原子炉停止。
地震のために外部電源喪失、直ちに非常用ディーゼル発電機(D/G、独立2系統)作動。

同日 15時37分 津波襲来

浸水によるD/G作動不能によりすべての電動ポンプ作動不能

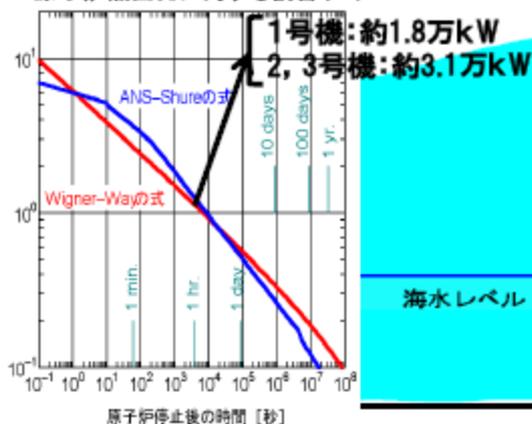
注記:

- 地震時に運転中の全てのユニットは自動的に停止された。
- 津波が襲う前までは、非常用ディーゼル発電機(D/G)は適切に作動していた。

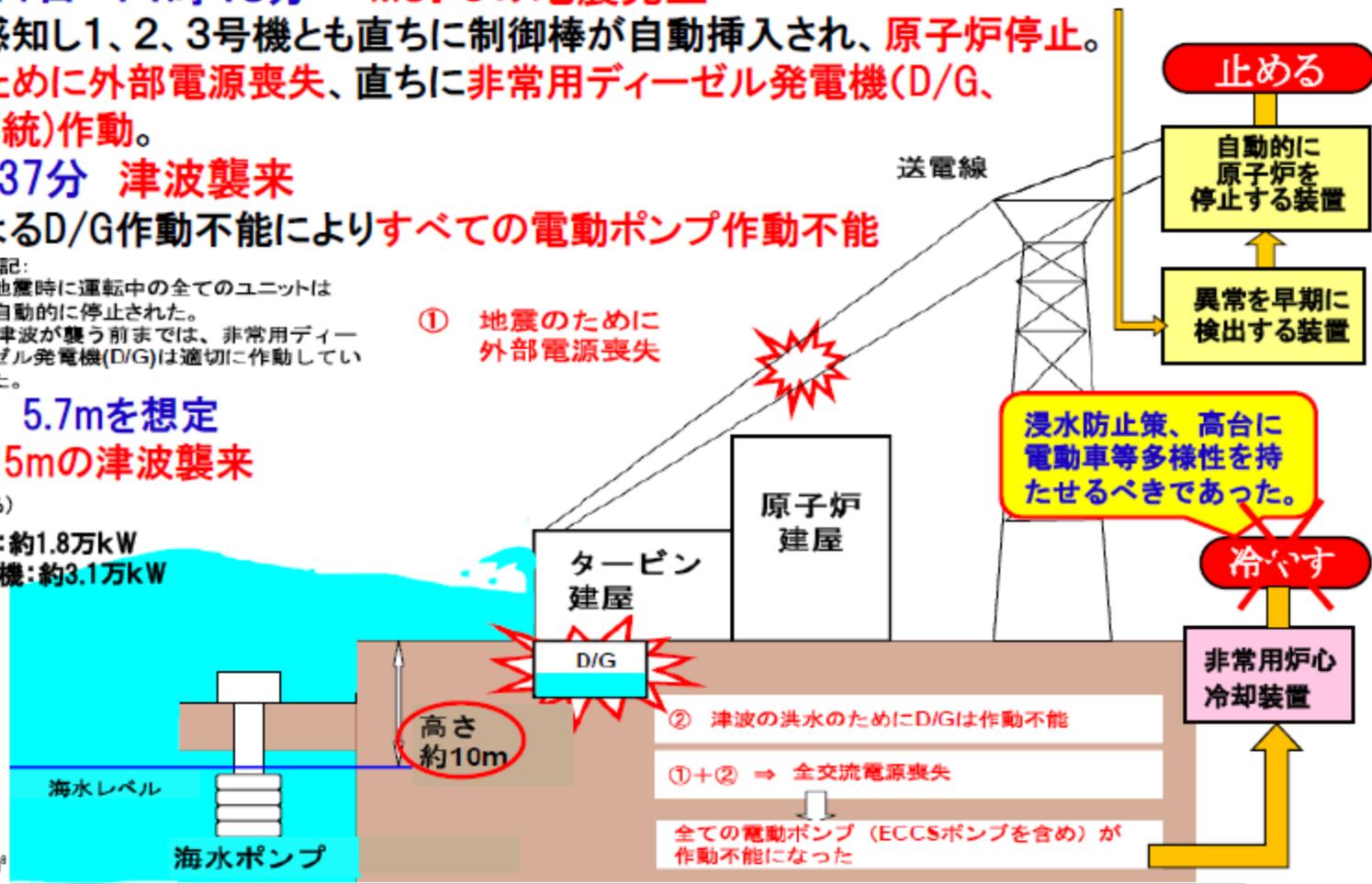
最大津波 5.7mを想定

→ 約15mの津波襲来

原子炉熱出力に対する割合(%)



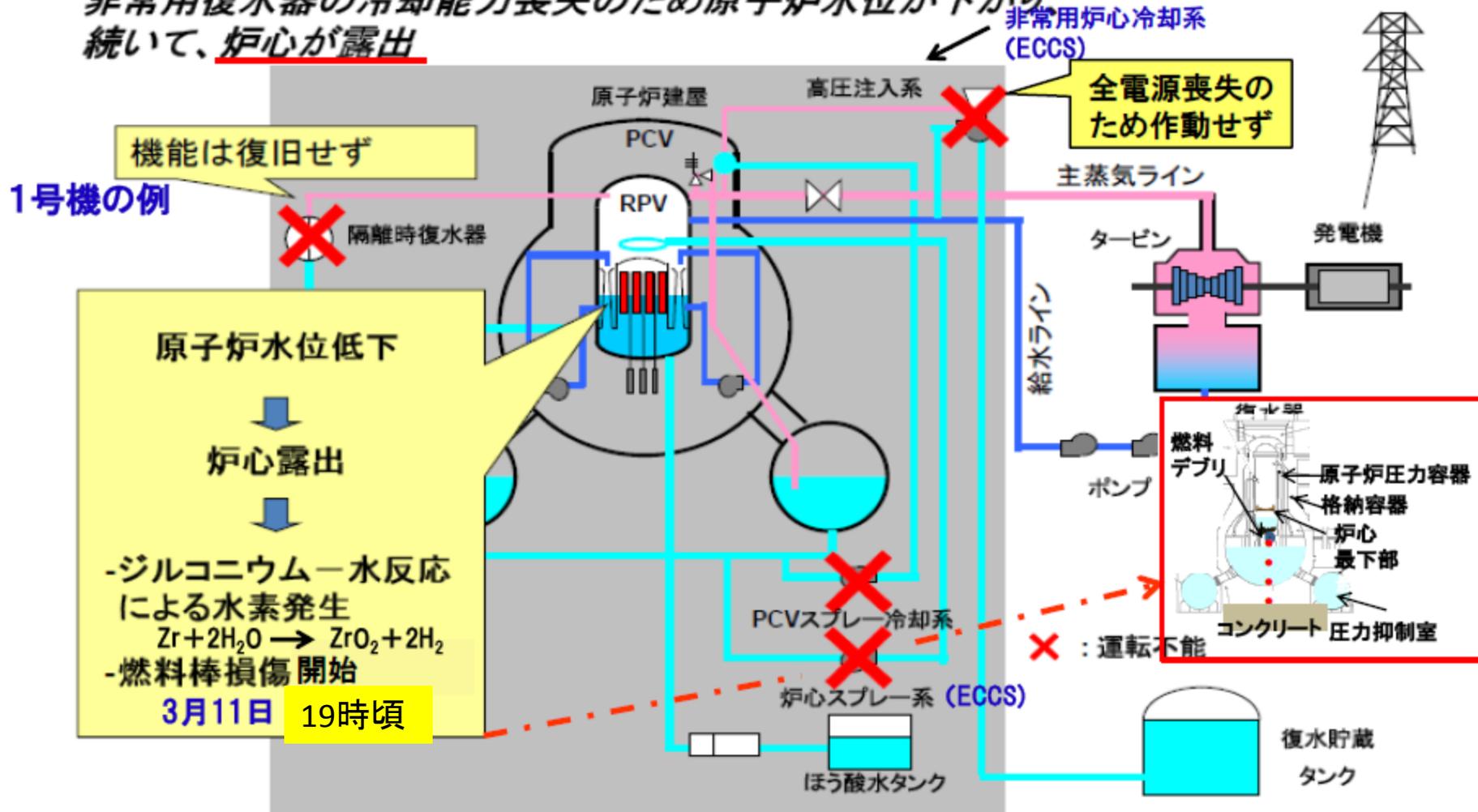
出典



東電福島第一発電所事故(2)

燃料を冷やせなかった結果どうなったのか

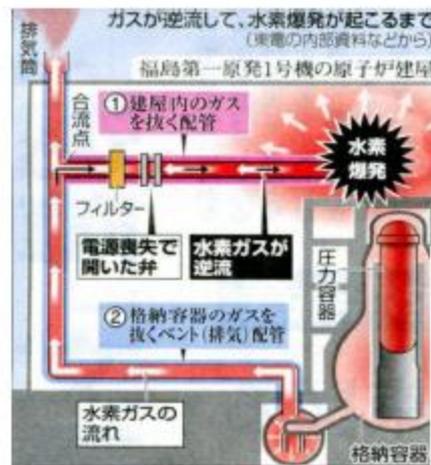
非常用復水器の冷却能力喪失のため原子炉水位が下がり、続いて、炉心が露出



東電福島第一発電所事故(3)

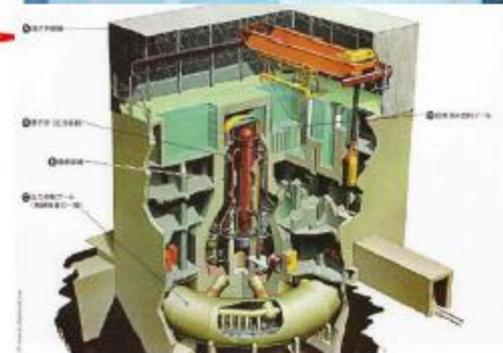
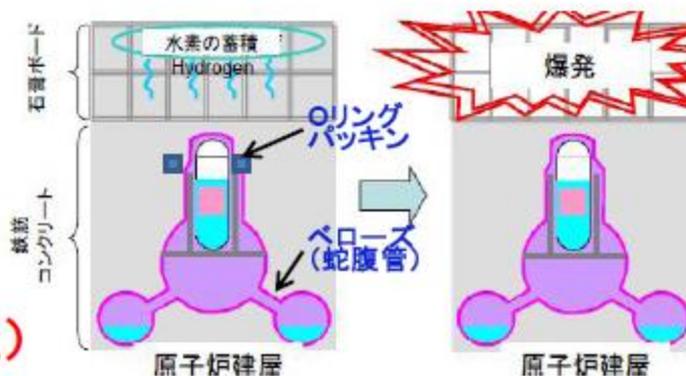
何故水素爆発を起こし、放射性物質を放出したか

- ジルコニウム-水反応により大量の水素発生
- 原子炉圧力容器の内圧が上がり、圧力容器底部の損傷部から水素、高温水蒸気等が格納容器へ漏洩
- 格納容器内の温度、圧力が上昇し、水素は格納容器蓋のOリング過温破損及び配管、ケーブル等の貫通部等から原子炉建屋へ漏洩
- ベントした水素が原子炉建屋へ逆流
- 原子炉建屋上部で水素爆発(水素4%、酸素5%以上)
1号機:12日15時36分
- 水素爆発に伴い、放射性物質を外部に放出(ただし、2号機が主)



(朝日新聞より)

石膏ボード部



福島事故の直接的原因

- 起因事象;地震、津波
- 炉心溶融(冷却不足)の原因
 - 全電源喪失
 - 冷却系機器損傷
 - IC機能停止(1号機)
 - 圧力容器減圧と代替注水の遅れ
 -
- 放射能放出(水素爆発)の原因
 - 水-ジルコニウム反応
 - 格納容器ベントの遅れ
 -

福島事故の間接原因

- 材料、構造設計面
 - 送電線、燃料被覆管、BWR格納容器・・・
- 配置設計面
 - 非常用DG、配電盤・分電盤、海水Pp・・・
- システム設計面
 - 水位計、IC隔離弁、ベント破壊弁・・・
 - （一つの機能を発揮するために必要な一群の機器設備）
- AM対策（の有効性確認）面
 - 減圧・消防車注水・・・

* SSC (Structures, Systems and Components)

(参考)IAEAへの報告28項目 + α

(2011年6月原子力災害対策本部)

		問題点	28項目
基本設計	複数立地 SAの防止	共通原因事故、対応 電源、必須機器設備 系統保護 BWRプール位置、冷却方途 BWR格納容器←非凝縮性ガス	6 2、8 4、7
想定事象	外部事象	地震、津波、航空機、テロ・・・複合、 リスク評価	1、16、27
SA対策	多重障壁の独立性 AMの有効性 放射性廃棄物	燃料、RPV、PCV、安全系 代替電源、水源の確保 代替注入方法← 有効性の確認 水素爆発対策、CVベント 計測装置、環境モニタリング体制 事故対応施設居住性、機材 拡散予測 処理、処分方策←汚染水、除染対策	26 3、5 9、10 14、17 11、12 21
体制	体制の有効性	オフサイトセンター 、防災体制、 責任体制 訓練、人材確保 地域広報、避難等基準 国際協力 保安院、安全チェック体制、法体系、安全文化	15、18 13、25 19、22 20 23、24、28

根本原因

- 過酷事故対策を規制要件とせず、事業者の自主対策としてきた。この結果、
 - 想定津波高さをはじめ津波に関する対策が甘かった。津波高さに関する指針が策定されていなかった。さらに、津波による重要機器の浸水、破損の影響等を考慮しなかった。
 - 長期間に亘る全交流電源喪失を考慮していなかった。さらに、米国における同時多発テロの教訓(全電源喪失)を生かさなかった。
 - 同一サイトで多数基が同時に事故を起こすことは想定されていなかった。
 - 事業者は、過酷事故に対する従事者の教育訓練をおろそかにしていた。さらに技術的対応を含む防災訓練も形骸化していた。
- 総じて、事業者、規制当局とも過酷事故に対する真摯な対応に欠けていた。

規制委員会の今後の事故調査項目

(東京電力福島第一原子力発電所における事故分析に係る検討会について
平成25年3月27日原子力規制委員会)

○国会、政府事故調において引き続き検証等が必要とされている事項

- 地震動による安全上重要な設備等への影響
 - ・ 小規模な冷却材喪失事象の発生の可能性及びその影響
 - ・ 一部の非常用交流電源が津波以外の要因によって喪失した可能性 等
- 事象進展に関連する論点
 - ・ 1号機非常用復水器(IC)の作動状況(弁動作等)、出水元の特定
 - ・ 1号機の逃し安全弁(SR弁)の作動状況
 - ・ 3号機使用済燃料プールにおける再臨界の可能性
 - ・ 4号機原子炉建屋の水素爆発における水素発生源 等

○事故及びその後の対応によって受けた影響分析が必要と考えられる事項

- 格納容器の破損箇所の特定
- 格納容器の劣化等に係る分析(海水影響、高温高圧による影響)
- 溶融落下したデブリの状況確認 等

○その他技術的に分析等が必要と考えられる事項

- 放射性物質の漏えい経路及び放出量評価
- 圧力抑制室における温度成層化の可能性 等

2. 対策

(目次)

- 事故後の代表的な対策経緯
- 総まとめとしての新規制基準の策定

(再稼働と安全な運転に向けて)

- 残された課題
 - 規制委員会の今後の検討
 - 新規制基準の今後の課題 ← *

原子力安全・保安院による緊急対策指示

(各電力会社へ、2011年3月30日)

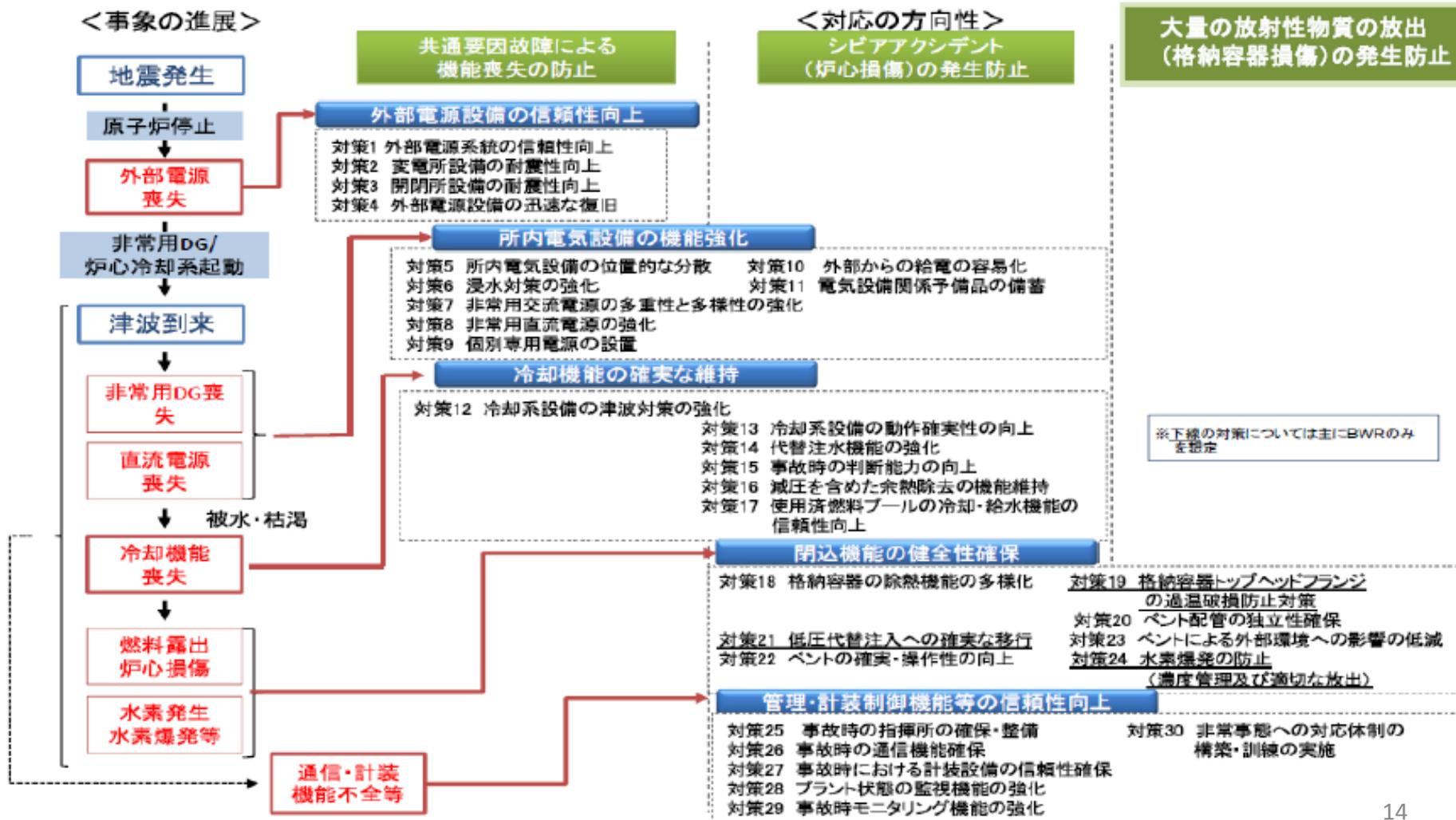
フェーズ	緊急安全対策	抜本対策
	短期	中長期
完了見込み時期	1ヶ月目途 (4月中旬頃)	<u>事故調査委員会等の議論に応じて決定</u>
目標 (要求水準)	<u>津波により①全交流電源、②海水冷却機能、③使用済燃料貯蔵プール冷却機能を喪失したとしても、炉心損傷、使用済み燃料損傷の発生を防止</u>	今回の災害をもたらした津波を踏まえて設定される「想定すべき津波高さ」を考慮した災害の発生を防止
具体的対策の例	【設備の確保】 <ul style="list-style-type: none"> ・電源車の配備 (原子炉や使用済み燃料プールの冷却用) ・消防車の配備 (冷却水を供給するためのもの) ・消火ホースの配備 (淡水タンクまたは海水ピット等からの給水経路を確保するためのもの) 等 【手順書等の整備】 <ul style="list-style-type: none"> ・上記の設備を利用した緊急対応の実施手順を整備 【対応する訓練】 <ul style="list-style-type: none"> ・実施手順書に基づいた緊急対策の訓練を実施 	【設備の確保】 <ul style="list-style-type: none"> ・防潮堤の設置 ・水密扉の設置 ・その他必要な設備面での対応 ※以下順次設備面での改善を実施すること(例:空冷式ディーゼル発電機、海水ポンプ電動機予備品の確保等) 【手順書の整備】 【対応する訓練】
保安院の確認等	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急安全対策の実効性を担保する省令の改正、同対策を盛り込んだ保安規定の認可 ・緊急安全対策の実施状況に対して検査等で厳格に確認 	
事業者の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・設備については、現在、鋭意調達中。(配置場所も確保中) ・今回の事故を踏まえて手順書を新規に作成し、訓練を実施。 ・緊急安全対策確認後も継続的な改善に取り組み、その信頼性向上を図る。 	

福島第一事故の技術的知見に関する意見聴取会とりまとめ

(原子力安全・保安院)
2012年年3月

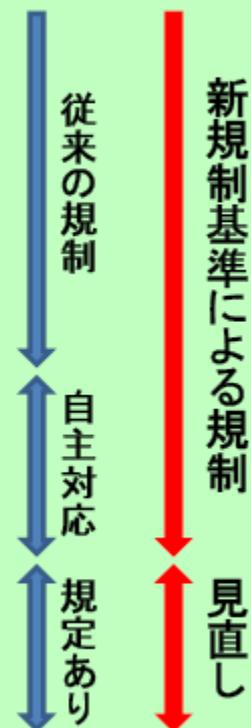
30項目の事故対策

大量の放射性物質の放出
(格納容器損傷)の発生防止



原子力発電所の安全強化策

防護レベル	目的	目的達成の手段	プラント状態
レベル1	機器故障、人的過誤の防止	保守的な設計、高い品質	通常運転
レベル2	異常の制御、故障の検知・修復	確立した検知系、原子炉自動停止	運転時の異常な過渡変化
レベル3	設計基準内への事故の制御	非常用炉心冷却系、格納容器等	設計基準事故
レベル4	設計基準事故を超える過酷事故の防止・緩和	設備等の追加と厳格な手順書作成、教育、訓練	過酷事故 (炉心損傷、格納容器破損、放射性物質の放散)
レベル5	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	サイト外の緊急時対応	防災



その他、地震・津波対策として、「基準津波」の設定、防潮堤の整備等及び活断層の明確化など

規制基準の改定

原子力規制委員会は、昨年9月19日に設置された。同設置法に従い、規制委員会は、原子力発電所については10カ月以内に、研究炉、燃料使用施設については15カ月以内に**重大事故**（同法では過酷事故を重大事故と称している）を含む規制基準（安全基準から名称を変えた）を新たに決定することが求められている。

<従来 of 安全基準>

炉心損傷に至らない状態を想定した設計上の基準（設計基準）
（単一の機器の故障のみを想定等）

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
信頼性に対する考慮
電源の信頼性
冷却設備の性能
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

<新安全基準>

放射性物質の拡散抑制
意図的な航空機衝突への対応
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 （複数の機器の故障を想定）
自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
信頼性に対する考慮
電源の信頼性
冷却設備の性能
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

（シビアアクシデント対策）
新設

強化

強化

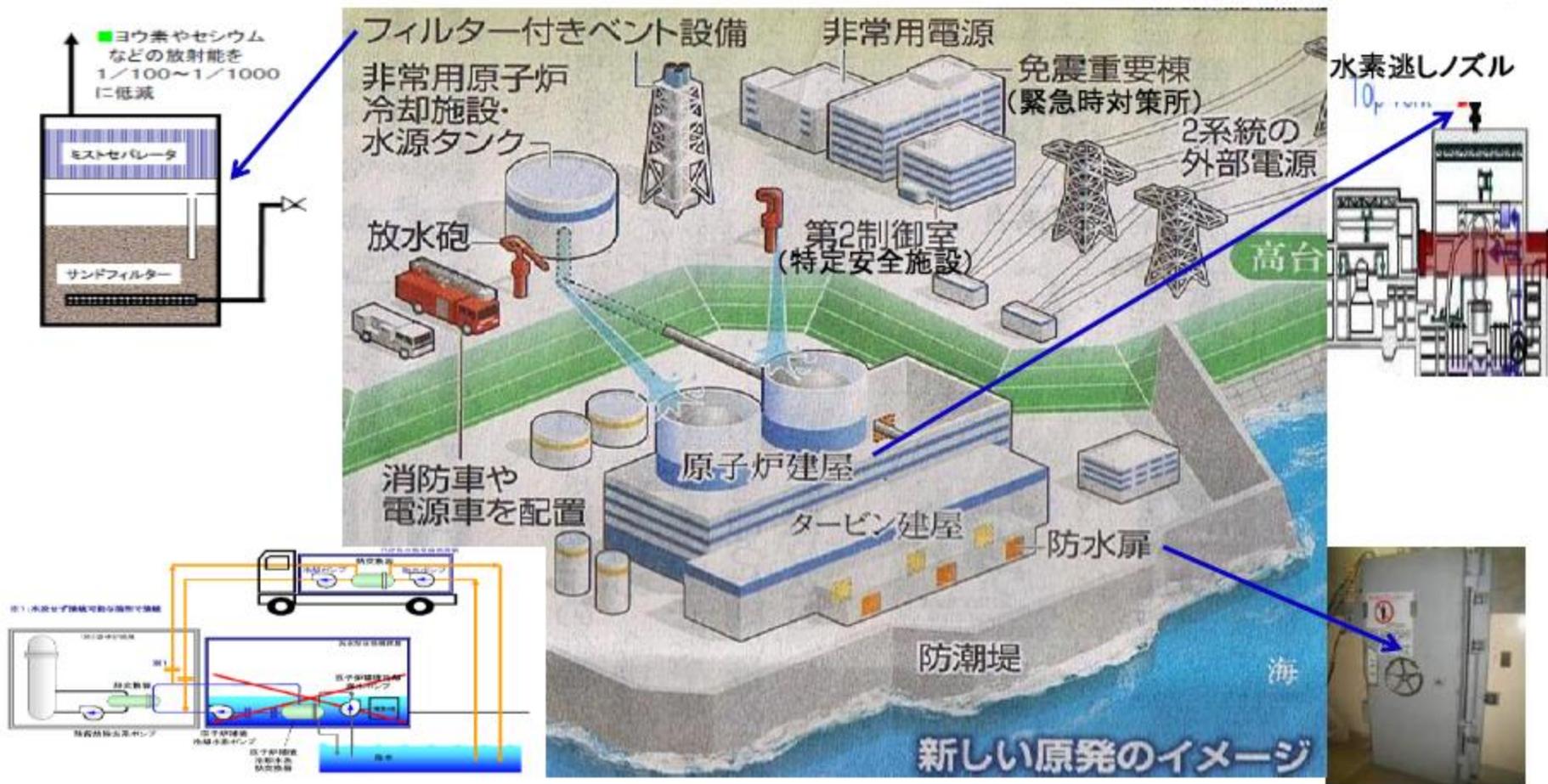
新規制基準の新たな要求事項

(新規制基準において新たに要求する機能と適用時期(案))

耐震・対津波機能 (強化される主な事項のみ記載)	基準津波により安全性が損なわれないこと	基準津波の策定、防潮堤や防潮屏の設置
	津波防護施設等が高い耐震性を有すること	防潮堤や敷地内の津波監視施設の耐震性確保
	(活断層評価にあたり必要な場合40万年前まで遡ること)	必要な場合には断層の活動性を詳細に調査
	(基準地震動策定のため地下構造を三次元的に把握すること)	起震車等を用いた地下構造調査
重大事故を起こさないために設計で担保すべき機能(設計基準) (強化される主な事項のみ記載)	(安全上重要な建物等は活断層の露頭がない地盤に設置)	(安全上重要な建物等は活断層の露頭がない地盤に設置)
	火山、竜巻、外部火災等により安全性が損なわれないこと	火山、竜巻、外部火災等による影響の評価、必要な改造、手順書整備、訓練
	内部溢水により安全性が損なわれないこと	内部溢水による影響の評価、必要な改造、手順書整備、訓練
	内部火災により安全性が損なわれないこと	火災発生防止、検知・消火、影響軽減に必要な改造、手順書整備、訓練
	安全上重要な機能の信頼性確保	安全上重要な配管等の多重化
重大事故等に対処するために必要な機能 (全て新規要求)	電気系統の信頼性確保	外部電源2回線の独立、閉閉所や非常用DG燃料タンクの耐震性確保等
	最終ヒートシンクへ熱を輸送する系統の物理的防護	海水ポンプの物理的防護等
	原子炉停止機能	ほう酸水注入設備、手順書整備、訓練
	原子炉冷却材高圧時の冷却機能	RCIC等起動に必要な弁操作のためのバッテリー配備等、手順書整備、訓練
	原子炉冷却材圧力バウンダリの減圧機能	減圧用の弁操作のためのバッテリー配備等、手順書整備、訓練
	原子炉冷却材低圧時の冷却機能	恒設注水設備設置、可搬式注水設備配備、手順書整備、訓練
	事故時の重大事故防止対策における最終ヒートシンク確保機能	車載代替最終ヒートシンクの配備、手順書整備、訓練
	格納容器内雰囲気冷却・減圧・放射性物質低減機能	格納容器スプレイ代替注水設備の配備、手順書整備、訓練
	格納容器の過圧破損防止機能	格納容器フィルタ・ベント設備の設置(BWR)、手順書整備、訓練
	格納容器下部に落下した溶融炉心の冷却機能	格納容器下部注水設備の設置、手順書整備、訓練
	格納容器内の水素爆発防止機能	水素濃度制御設備の設置(PWR)※、手順書整備、訓練
	原子炉建屋等の水素爆発防止機能	水素濃度制御又は排出設備、水素濃度監視設備の設置、手順書整備、訓練
	使用済燃料貯蔵プールの冷却、遮へい、未臨界確保機能	可搬式代替注水設備、可搬式スプレイ設備の設置、手順書整備、訓練
	水供給機能	水源及び移送ルート、移送資機材確保、手順書整備、訓練
	電気供給機能	恒設及び可搬式代替交流電源の配備、恒設直流電源設備(既設)の増強、可搬式直流電源の配備、手順書整備、訓練
	制御室機能	炉心損傷時の被ばく評価に必要な資機材、手順書整備、訓練
	緊急時対策所機能	地震・津波の影響を受けない緊急時対策所の確保、被ばく評価、資機材確保等
	計装機能	プラント状態の把握能力を超えた場合のプラント状態の推定手段の整備等
	モニタリング機能	可搬式代替モニタリング設備の配備、手順書整備、訓練
	通信連絡機能	代替電源から給電可能な通信連絡設備配備、手順書整備、訓練
敷地外への放射性物質の拡散抑制機能	可搬式放水設備配備、手順書整備、訓練	
大規模自然災害や意図的な航空機衝突等のテロリズムによりプラントが大規模に損傷した状況で注水等を行う機能	地震・津波や意図的な航空機衝突の影響を受けにくい場所に可搬式注水設備、電源、放水設備等を分散配置、接続口を複数用意、手順書整備、訓練	

原子力発電所の安全強化策

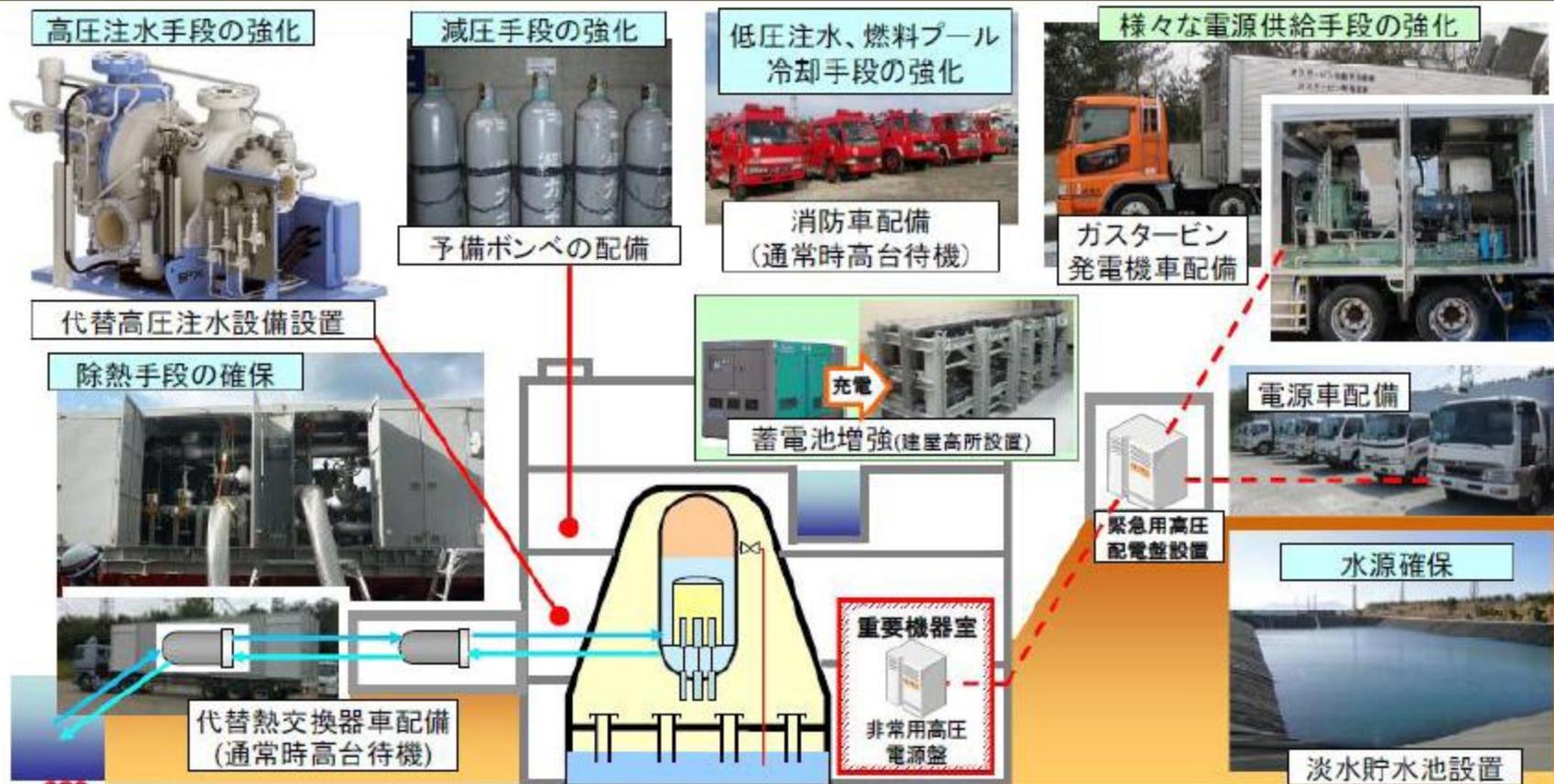
新規制基準に基づく外観



代替海水熱交換器設備例

全電源喪失事故対策例

教訓：全ての電源を喪失した場合の代替手段（高所電源、高圧注水、減圧、低圧注水、除熱、燃料プールへの注水、水源）が十分に準備されておらず、その場で考えながら対応せざるを得なかった。



(参考)

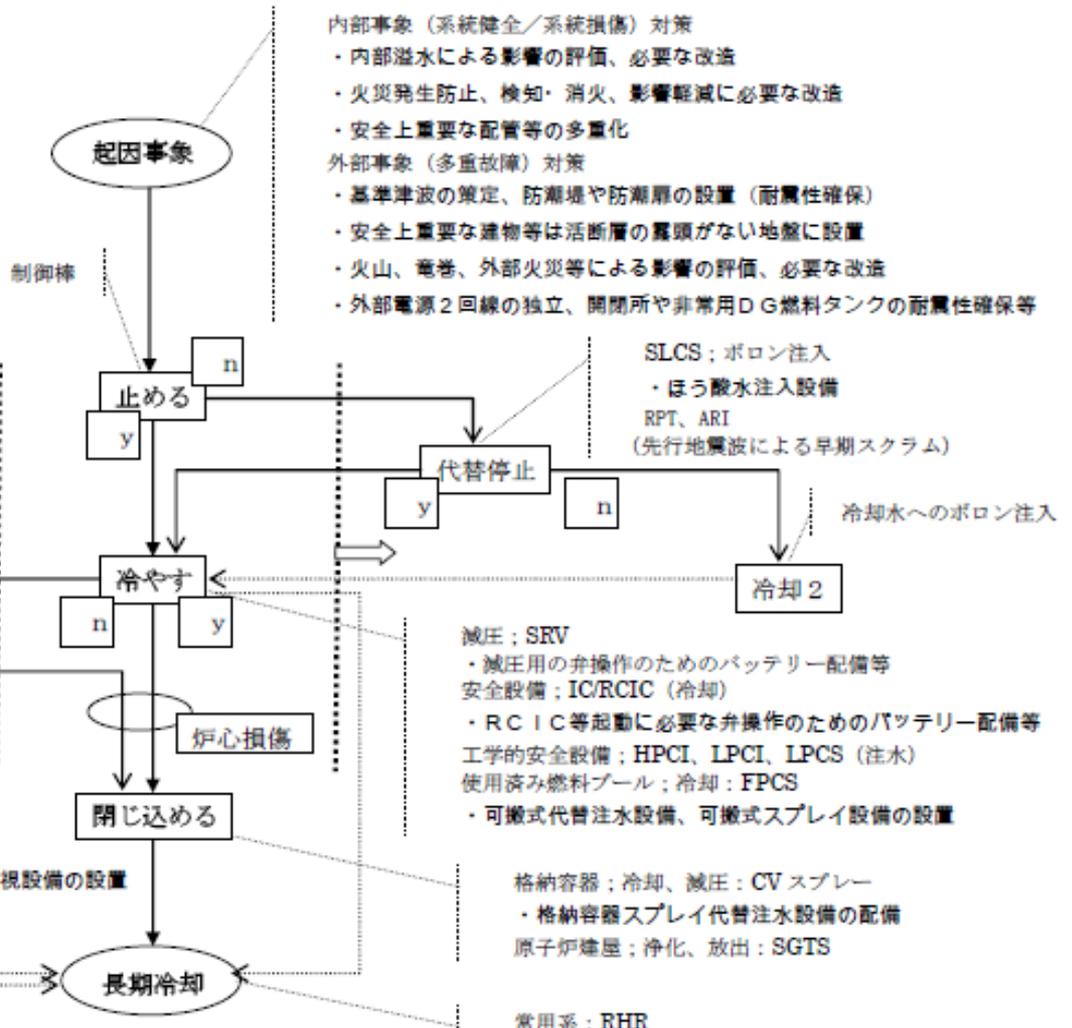
新規制基準による事故事象対応シーケンスの強化 H25.5 上田
 (新規制基準において新たに要求する機能と適用時期 (案) より)

- 共通基本対策
- ・ 水源及び移送ルート、移送資機材確保
 - ・ 恒設及び可搬式代替交流電源の配備、恒設直流電源設備 (既設) の増強、可搬式直流電源の配備
 - ・ 炉心損傷時の被ばく評価と必要な資機材
 - ・ 地震・津波の影響を受けない緊急時対策所の確保、被ばく評価、資機材確保等
 - ・ 可搬式代替モニタリング設備の配備
 - ・ 代替電源から給電可能な通信連絡設備配備

- 消火系; D/DFPp
- ・ 恒設注水設備設置、可搬式注水設備配備
 - ・ 車載代替最終ヒートシンクの配備

- 燃料溶解
- 代替冷却
- 閉じ込め2
- 格納容器冷却、ベンディング
 - ・ 格納容器フィルタ・ベント設備の設置
 - ・ 水素濃度制御又は排出設備、水素濃度監視設備の設置
 - ・ 可搬式放水設備配備

- テロ等対策
- ・ 大規模自然災害や意図的な航空機衝突等のテロリズムによりプラントが大規模に損傷した状況で注水等を行う機能として、地震・津波や意図的な航空機衝突の影響を受けにくい場所に可搬式注水設備、電源、放水設備等を分散配置、接続口を複数用意



規制委員会の7月以降の検討課題

(原子炉規制委員会第21回発電用軽水型原子炉の新規制基準に関する検討チーム
平成25年4月4日資料)

(1) 重要度分類の見直し

- ・重要度分類指針; 福島第一原子力発電所事故の教訓や国際原子力機関(IAEA)ガイドでの重要度分類指針の策定などを踏まえた見直しを行う。
- ・耐震重要度分類; 耐震設計上の重要度分類について、上記の重要度分類指針の見直しと併せた見直しを行う。

(2) 要求内容の継続的検討

- ・原子炉水位計; 技術開発等の状況も踏まえ、規制要求の検討を行う。
- ・逃し安全弁; 技術開発等の状況も踏まえ、逃し安全弁に対する規制要求の検討を行う。
- ・原子炉主任技術者; シビアアクシデント時の対応を含む原子炉主任技術者の役割を明確化するとともに、その役割を踏まえた必要な資格要件を検討する。

(3) 基準関連文書体系の見直し・体系化

- ・旧原子力安全委員会安全審査指針類の見直し; 旧原子力安全委員会の安全審査指針類のうち、基準に関連する文書の体系化を図るとともに、最新の知見を取り入れた見直しを行う。
- ・規定の詳細さのバランス化; 基準規則における要求事項については、規定の詳細さに粗密があるため、全体としてのバランスを整える。

新規制基準の今後の課題

- 代替設備等の有効性→今後の電力の審査資料
 - 設計要件の明確化、実施性
 - 具体的な状況設定;特に炉心溶融の有無(防止、緩和)
 - 判断基準の明確化;特に減圧・代替冷却
 - 必要な安全機能と機能発揮の保証(関連設備全体)
 - 具体的な有効性の実証
 - 評価方法
 - 「炉心損傷防止対策の有効性評価の判断基準」+ α ?
 - その他
 - 低頻度影響大事象の対処
 - どこまで対応;べき乗則リスク、テロ
 - 社会的受容、特にリスク受容
 - 原子力発電所と自然災害(ex隕石)とのリスク比較
 - 他のリスクとの比較;車、原子力なしのリスク
- * How Safe is Safe Enough?

3. まとめ

- 新規制基準 → 「炉心溶融・放射能放出」前提の規制
- 全体的な検討継続、新しい安全思想の確立が必要
 - 福島事故原因の究明も含め、新規制基準の技術的問題点についての継続的検討
 - 安全目標の設定とその達成の実証
 - 炉心溶融確率や事故時の放出放射エネルギーの数値目標
 - 最終的に長期冷却に持ち込めること およびその間の環境放出放射エネルギーが十分に制限されること
 - バックフィット(既設炉への適用)の考え方
- 特に社会的な受容のための説明や意思疎通が必要
 - 安全問題は社会との境界問題であるので、政治経済、社会問題も含めた全体的な検討も必要(規制委員会の位置づけも含む)
 - 十分な説明、特に再稼働に関しては十分な地元説明が必要