

原子力発電所の安全対策

2019年5月29日

長岡技術科学大学

日本原子力学会シニアネットワーク連絡会会員

矢野 隆（元三菱重工）

本日の内容

1. はじめに
2. 設計・運転段階での安全確保
3. 原子力災害時の緊急避難について
4. 世界の原子力発電所の事故事例と教訓
5. まとめ

1. はじめに

(1)原子力発電の長所

- ・ 燃料補給なしで長時間、運転継続可能
- ・ 安定電源でありエネルギー安全保障上有利
- ・ CO2発生量が少なく、温暖化防止に有効

(2)原子力発電の短所

- ・ 崩壊熱のため運転停止後しばらく冷却必要
- ・ 健康リスクある放射線の発生
- ・ Puなど核物質管理

参考：崩壊熱について

原子核は陽子(Z)と中性子(N)で構成され、
軽い核は $N/Z=1.0$ で安定するが、
重いウランの原子核は $N/Z=1.6$ に達する。

ウランが核分裂によって比較的軽い原子核に変わると、中性子が過剰となり、中性子を陽子に変えながら安定核を目指す。

そのため、時間遅れを伴って β 崩壊を繰り返す。これにより生じるのがFP崩壊熱である。(アクチノイド崩壊熱は、運転停止直後の発熱量が小さいため無視する)

参考：崩壊熱の時間的变化 (U235、2年燃焼の場合)

- ・ 炉停止直後：運転時出力の約6.5%
→ $138\text{万kWt} \times 0.065 \div 9\text{万kWt}$
- ・ 8時間後：炉停止直後の 1/10
- ・ 4カ月後：炉停止直後の 1/100
- ・ 3年後：炉停止直後の 1/1000
→ 90 kWt (77,000 kcal/h)

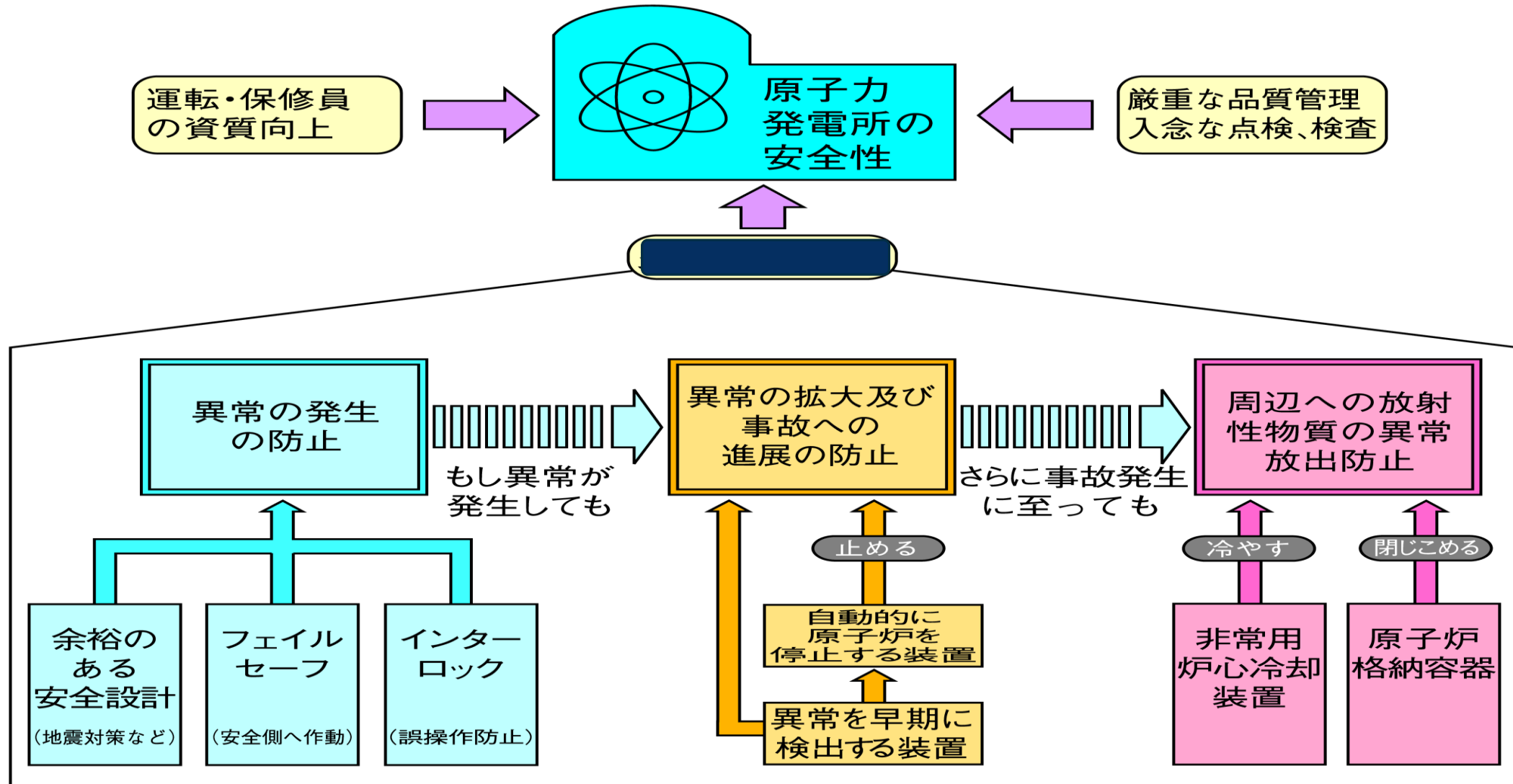
[出典：日本原子力学会誌、Vol.53, No.8(2011)、「軽水炉燃料崩壊熱のふるまい 福島第一発電所の崩壊熱挙動理解のために」東京都市大学 吉田正]

2. 設計・運転段階での安全確保

- (1) 深層防護
- (2) 原子炉の固有の安全性
- (3) 安定した地盤に建てられ揺れにくい
- (4) 定期検査による健全性確認
- (5) 新規制基準について

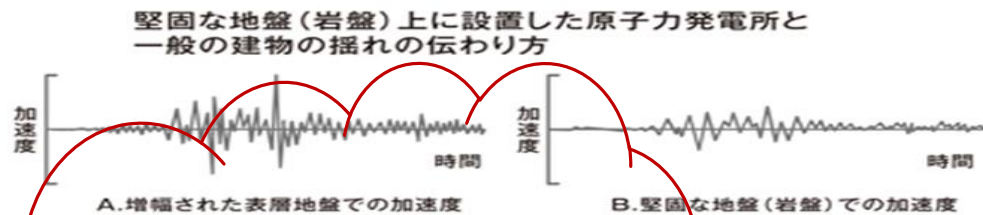
2-(1) 深層防護について

安全確保のしくみ



2-(3)の例：原子力発電所は揺れにくい

原子力発電所と一般建築物の揺れの差

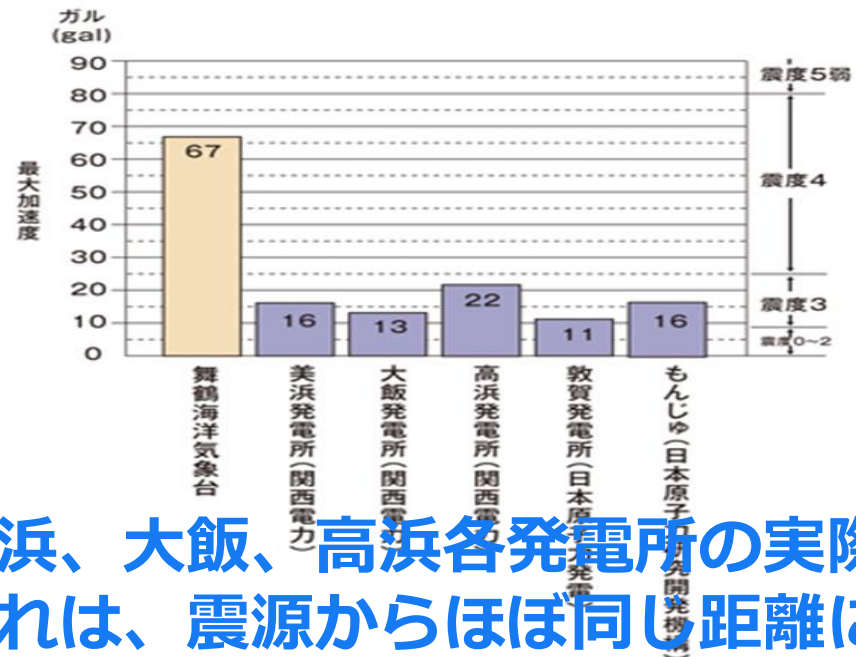


(注) 地震波形は模式図

堅固な地盤（岩盤）での揺れは表層地盤に比べ一般に $1/2 \sim 1/3$ 程度の少なさである。



1995年兵庫県南部地震による若狭湾周辺の最大加速度観測値

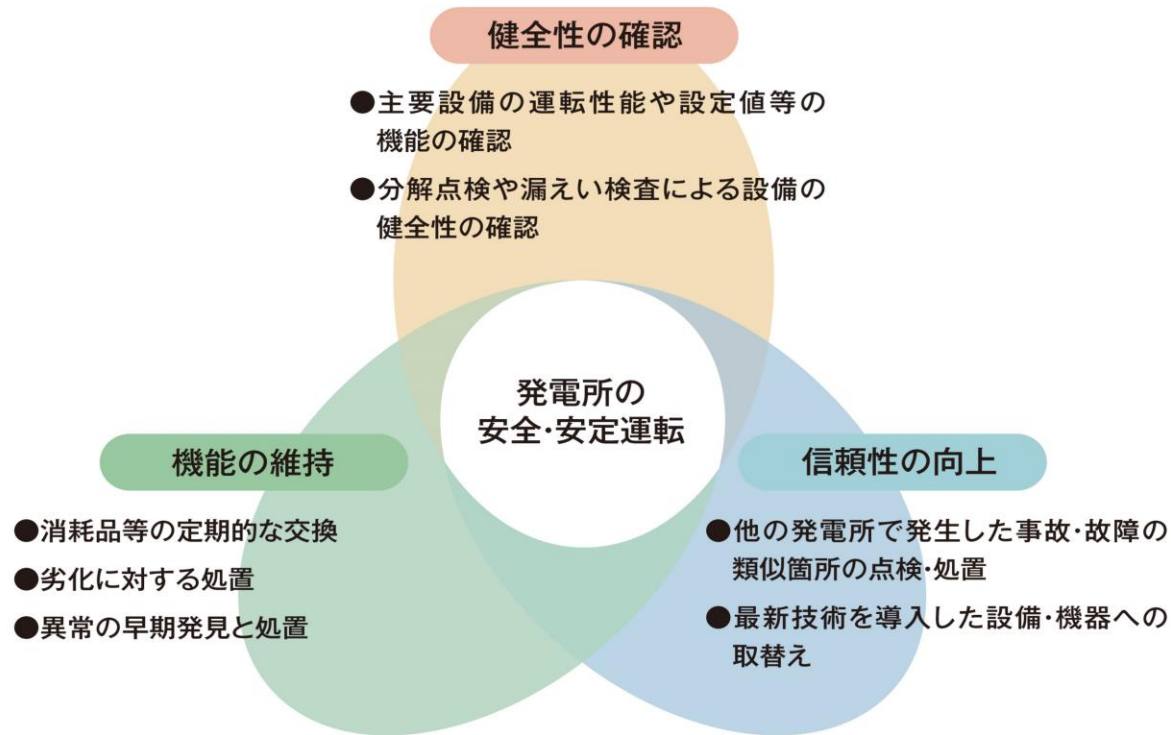


美浜、大飯、高浜各発電所の実際の揺れは、震源からほぼ同じ距離にある舞鶴海洋気象台より $1/3 \sim 1/5$ の少なさであった。

2-(4)の例

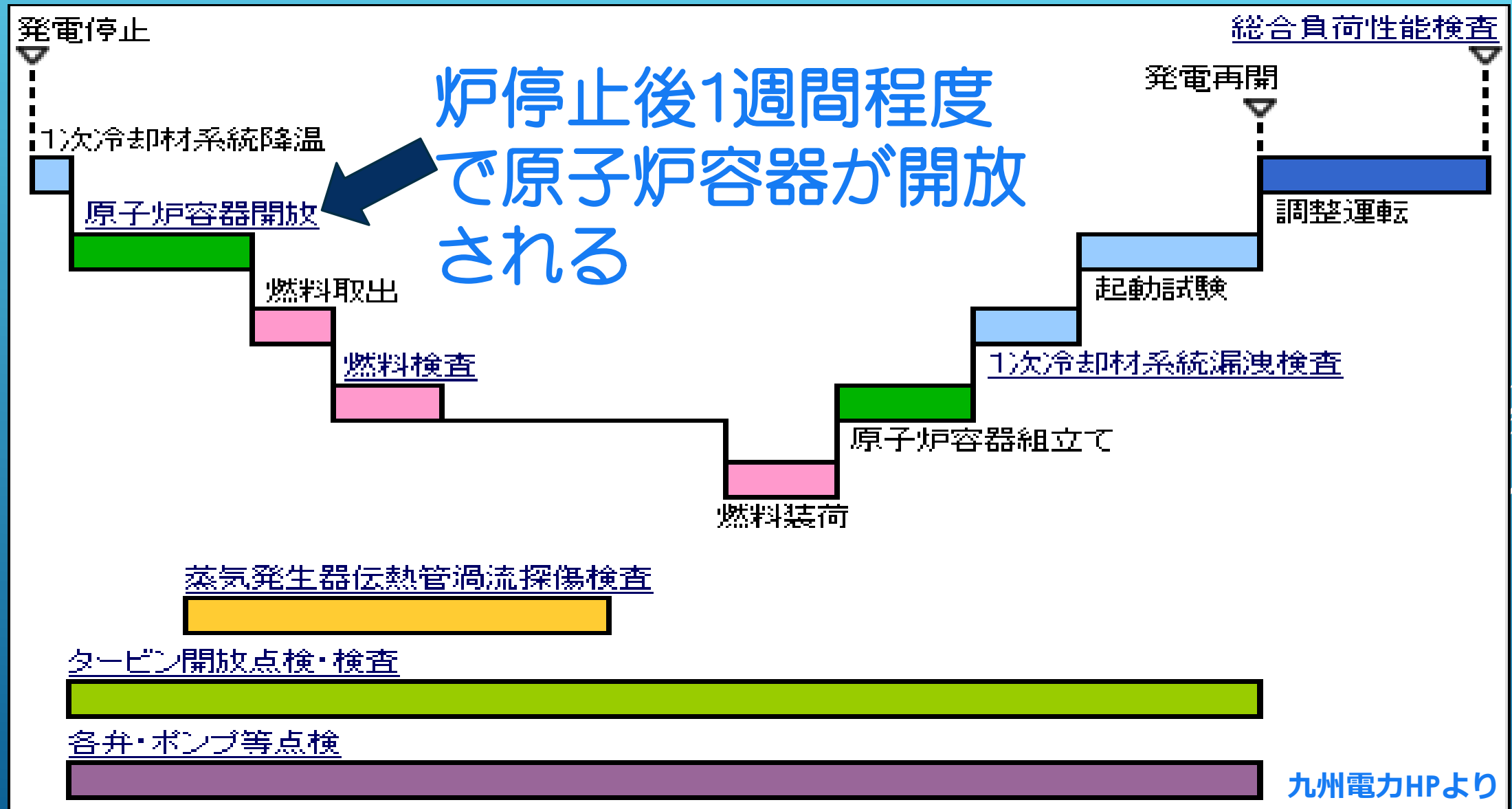
原子力発電所は定期的に検査される

原子力発電所の定期検査の目的



**健全性の確認
機能の維持
信頼性の向上**

<参考用> 定期検査工程(PWRプラント例)



2-(5) 新規制基準について

福島第一事故後に新規制基準が制定された。

人の安全に加えて環境を守ることが目的に加えられた。

また、シビアアクシデント対策の義務化やバックフィット制度の導入などが加えられた。

原子力発電所の新規制基準の概要

原子力発電所の新規制基準

〈従来の規制基準〉

テロ対策

フィルタ・ベント

可搬型電源・注水設備

シビアアクシデントを防止するための
基準（いわゆる設計基準）
（単一の機器の故障を想定しても
炉心損傷に至らないことを確認）

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

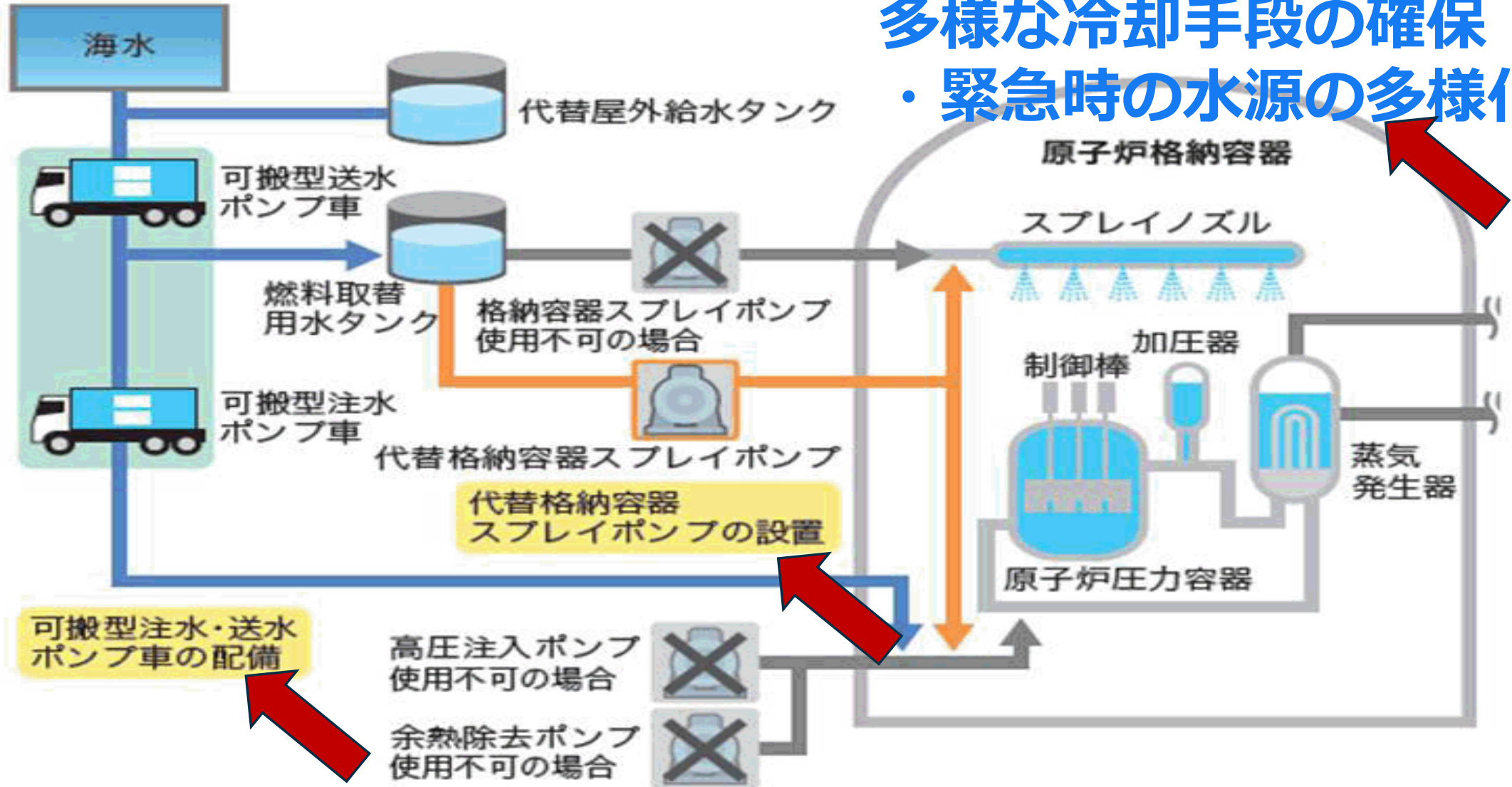
設計基準の強化
外的事象に対する
考慮の拡大

〈新規制基準〉

意図的な航空機衝突への対応	新設 (テロ対策)(シビアアクシデント対策)
放射性物質の拡散抑制対策	
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)	新設
内部溢水に対する考慮(新設)	
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)	
火災に対する考慮 (難燃性ケーブルの使用等)	強化又は新設
電源の信頼性(独立の2回線確保等)	
その他の設備の性能 (通信設備の強化等)	
耐震・耐津波性能(防潮堤の設置等)	強化

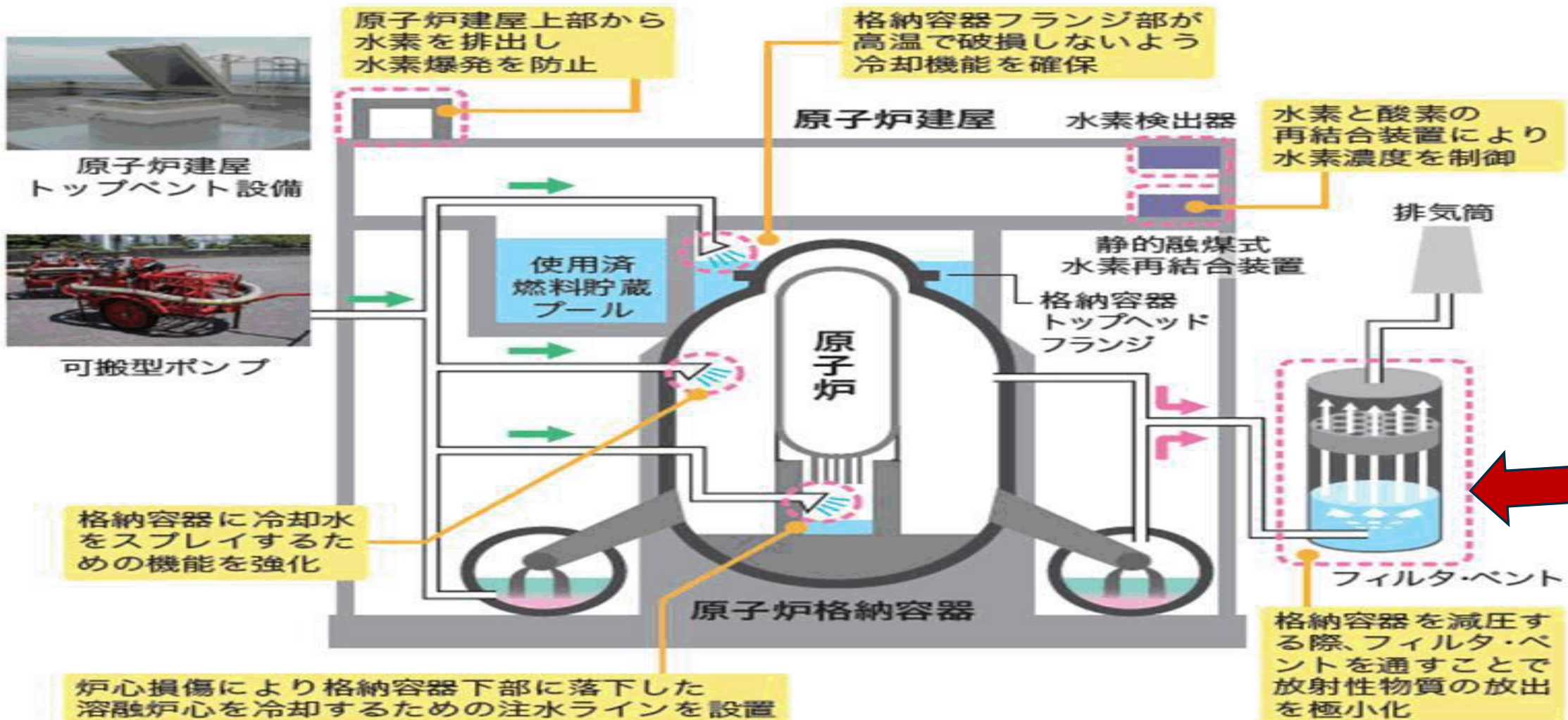
シビアアクシデント対策（例1：炉心損傷防止対策）

●対策例(PWR[加圧水型軽水炉]の事例)



シビアアクシデント対策（例2：格納容器破損防止）

●対策例(BWR[沸騰水型軽水炉]の事例)



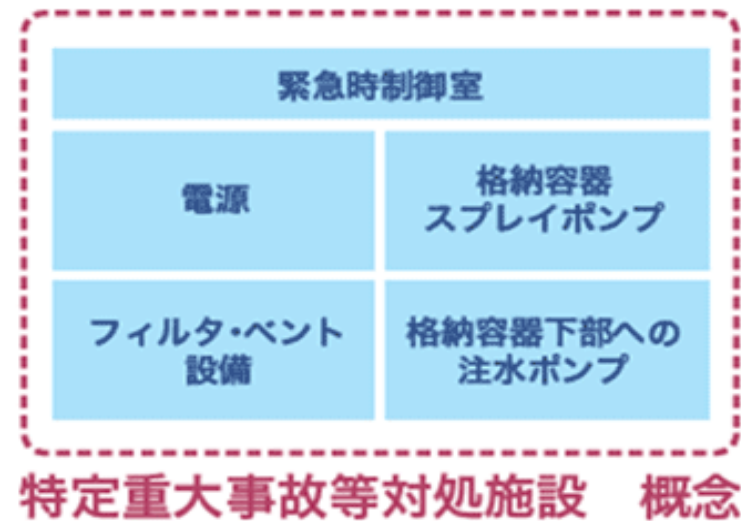
写真提供:東京電力(株)
日本原子力発電(株)

シビアアクシデント対策

(例3：意図的な航空機衝突への対応)

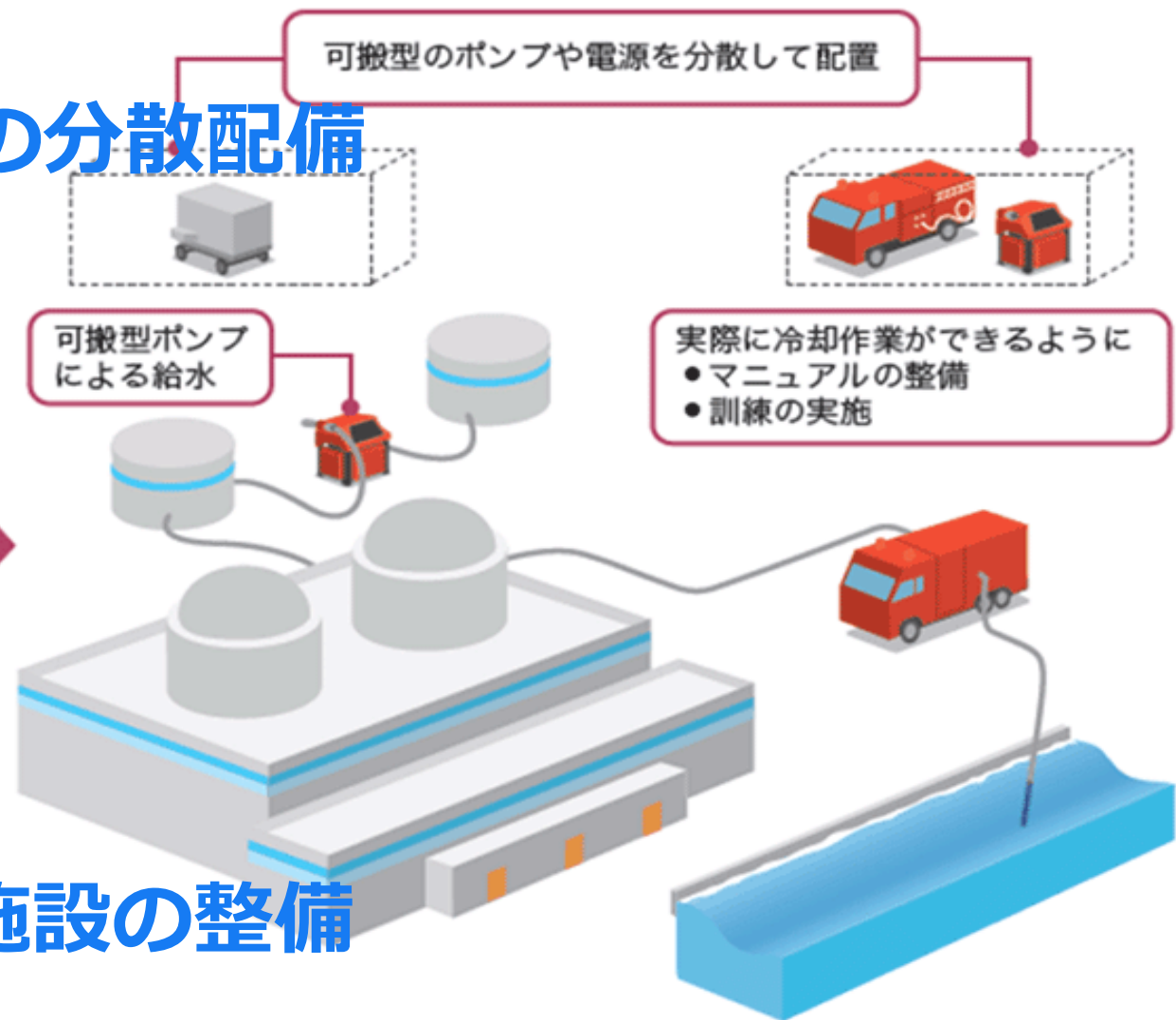
●テロ対策

可搬式設備等の分散配備



可搬設備のバックアップとなる恒設設備

特定重大事故等対処施設の整備



3. 原子力災害時の緊急避難について

原子力災害時の対策区域の拡大

約5km圏内

PAZ

(Precautionary Action Zone)

予防的防護措置を準備する区域

全面緊急事態に至った時点で、直ちに避難し、原則として安定ヨウ素剤を服用する。

約30km圏内

UPZ

(Urgent Protective Action Planning Zone)

緊急時防護措置を準備する区域

原則として屋内退避。

その後、発電所の状況に応じて、避難・一時移転や、安定ヨウ素を服用などの準備をする。



4. 世界の原子力発電所の事故事例と教訓(参考)

(1) 米国スリーマイルアイランド原子力発電所事故

(2) ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故

(3) 東電福島第一原子力発電所事故

4-(1)

スリーマイルアイランド原子力発電所事故の概要

○事故の主な経緯

1979年3月28日、アメリカのペンシルバニア州スリーマイルアイランド(TMI)原子力発電所2号機で主給水ポンプが停止。補助給水ポンプが自動起動したものの、ポンプ出口弁全閉で二次冷却水循環水が循環せず、また、自動起動した非常用炉心冷却装置(ECCS)を運転員が誤判断し、手動で停止した等、機器の故障や誤操作の結果、炉内構造物が一部溶解した。

○環境への影響

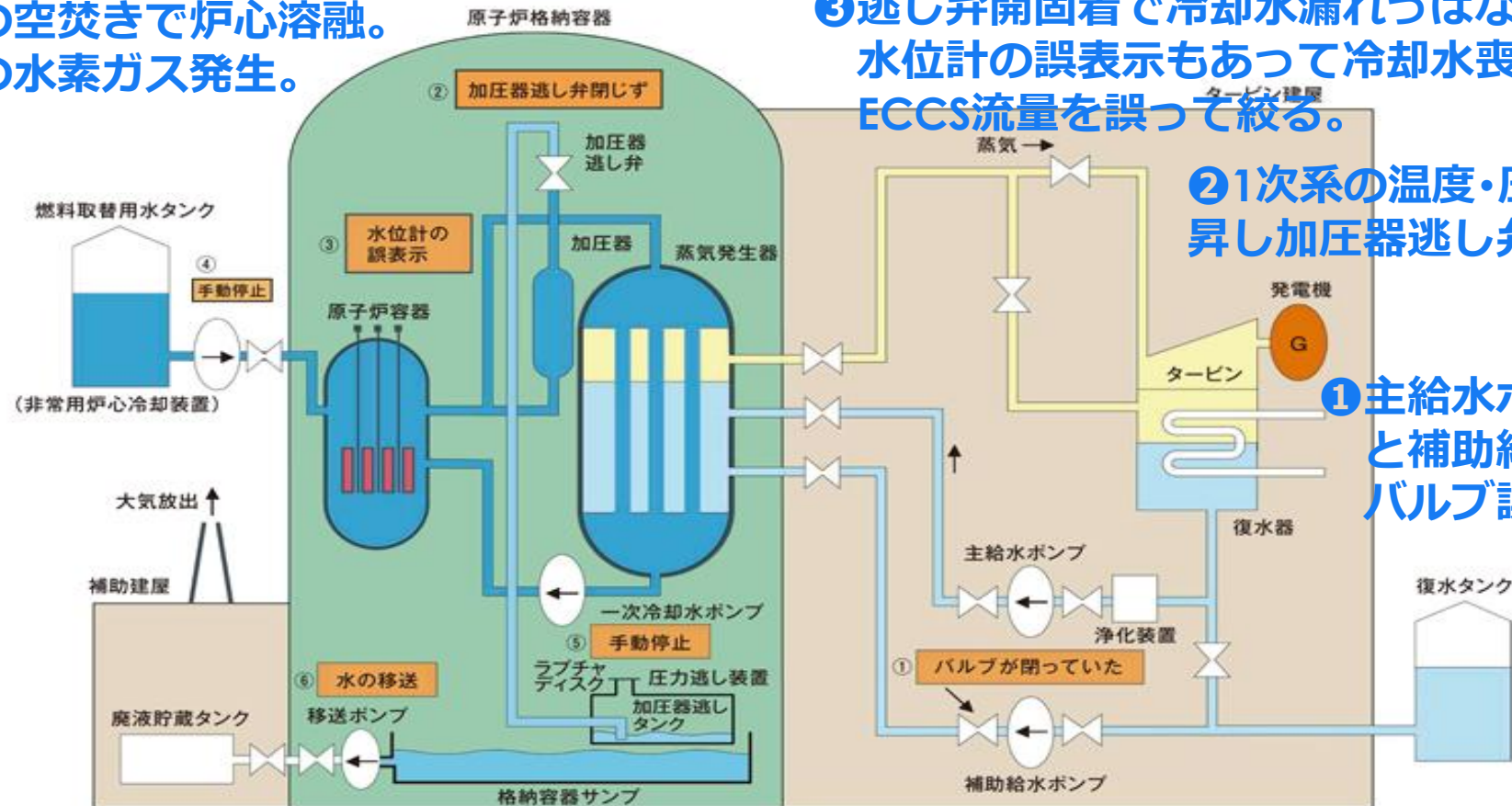
周辺の公衆が受けた放射線の量は最大で1ミリシーベルト、平均0.01ミリシーベルトと健康上影響のない極めて低いレベルであった。

④炉心の空焚きで炉心溶融。
大量の水素ガス発生。

③逃し弁開固着で冷却水漏れっぱなし。
水位計の誤表示もあって冷却水喪失に気付かず。
ECCS流量を誤って絞る。

②1次系の温度・圧力が上昇し加圧器逃し弁作動

①主給水ポンプの停止
と補助給水ポンプの
バルブ誤閉止



補足：米国スリーマイルアイランド(TMI)原子力発電所事故概要

①発生日：1979年3月28日（現地時間）

②場所：米国ペンシルバニア州（ワシントンD.Cの北北西約160 km）サスケハナ川の中州

③事故経過：

- ・弁誤閉止によりSGへの給水が止まって1次系の温度が上昇し、加圧器逃し弁から1次冷却水が流出し始めた。
- ・加圧器逃し弁が開固着したため、1次冷却水の流出が止まらなかった。ECCS自動起動したが、運転員が満水と誤認して流量を絞った。そのため炉心の2／3が露出し、炉心が溶融した。
- ・ジルコニウム水反応により大量の水素ガスが発生し、放射性物質が環境に放出された。

④環境影響：放射性希ガス 約 1×10^{17} Bq、ヨウ素131 約 6×10^{11} Bqが放出された。周辺公衆の被ばく線量は最大でも1 mSv以下。健康に与えた影響は殆ど無視できる程度だった。

⑤事故原因：安全系の補助給水系の弁の誤閉止やECCE誤停止等のヒューマンエラー、加圧器逃し弁の開固着、加圧器水位計の誤指示

⑥教訓：「我が国の安全確保対策に反映させるべき事項(52項目)」として、基準審査関係（安全設計審査指針など）、設計関係（1次冷却材の状態の監視方式など）など52項目が挙げられ反映された。

[出典：ATOMICA]

4-(2)チェルノブイリ原子力発電所事故

チェルノブイリ原子力発電所の構造

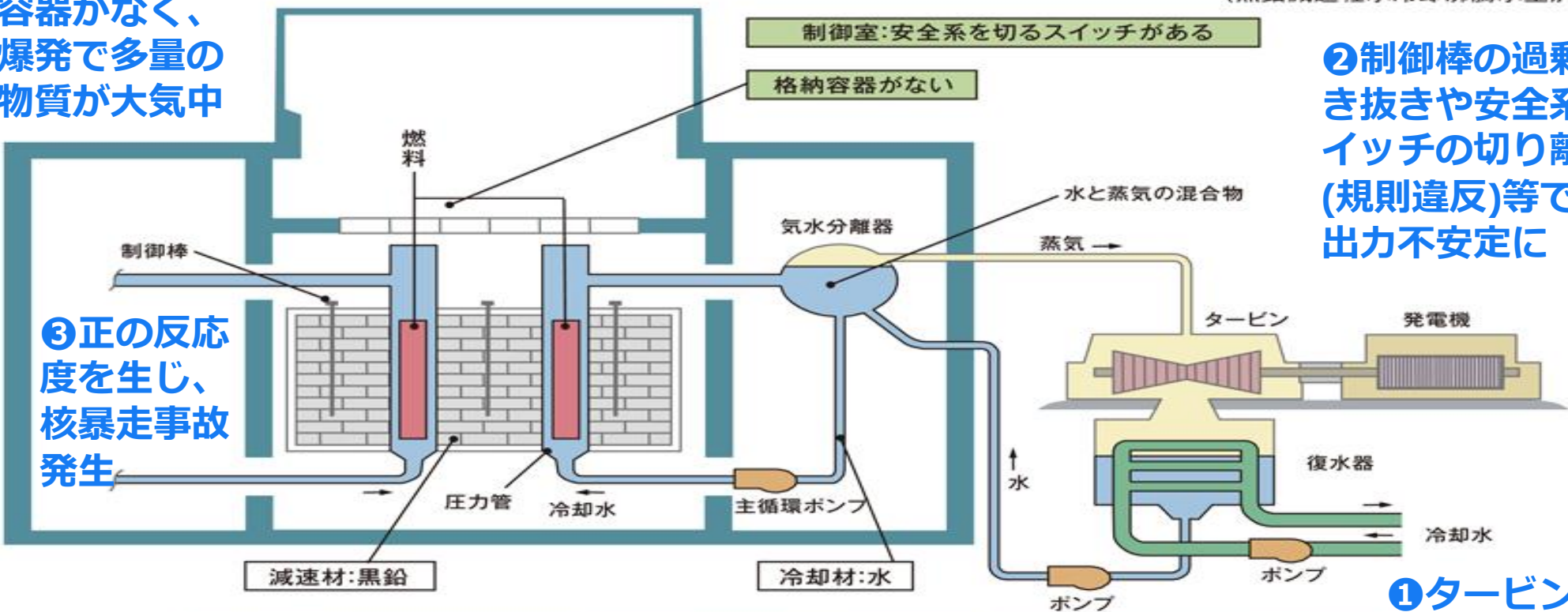
(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉RBMK)

④格納容器がなく、
火災、爆発で多量の
放射性物質が大気中
に放散

③正の反応
度を生じ、
核暴走事故
発生

②制御棒の過剰引
き抜きや安全系ス
イッチの切り離し
(規則違反)等で、
出力不安定に

①タービン慣性
力に関する特殊
試験を準備



	日本の原子炉	チェルノブイリの原子炉
自己制御性	あり	なくなる場合がある
冷却材	水	水
中性子の減速材	水	黒鉛
安全装置	インターロックにより危険操作の防止	容易に外せる
原子炉をカバーする丈夫な格納容器	あり	なし

補足：ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故概要

①発生日：1986年4月26日

②場所：キエフ市の北北西約100 km、プリピャ川の川岸

③事故経過：

- ・タービン慣性エネルギー利用に関する特性試験の準備中に原子炉熱出力を下げすぎたため、出力回復の目的で、制御棒の過剰引き抜き、原子炉保護信号の切り離し等の違反操作を行なった。
- ・試験を開始し、流量低下とともに炉心のボイド増加・原子炉出力上昇が始まり、出力暴走事故を招いた。
- ・火災、爆発が起こり、炉心のウランやプルトニウムと共に、多量・多種の放射性物質が大気中に放出され、ヨーロッパ等に拡散して多くの国にまたがる広範囲の重篤な放射能汚染を起こした。

④環境影響：

- ・希ガス 2×10^{18} Bq、ヨウ素131 1×10^{18} Bq
- ・急性放射線が原因の死亡 47人
- ・一般人の被曝 50mSv以上27万人、33mSv以上11万6千人

⑤事故原因：不適切な手順で規則に反した試験を実施したこと、および、安全保護回路を不正に切り離したこと。

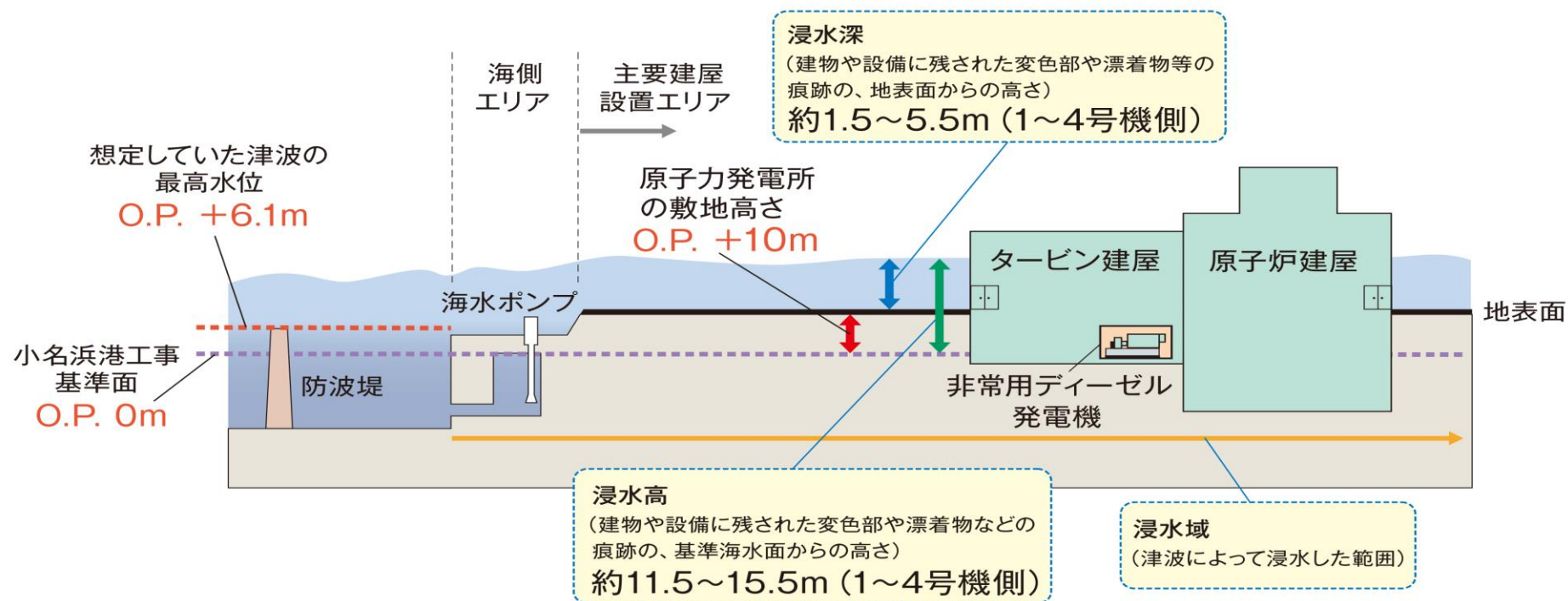
炉心出力特性も低出力域で正の反応度を有する不安定な原子炉であったこと。（PWR,BWRは固有の安全性がある。）

格納容器がなく、広範囲、高レベルの放射能汚染を招いたこと。（他の国の発電用原子炉は格納容器を有する。）

⑥教訓：事故の再発防止策として、制御棒引き抜き上限の設定、反応度操作余裕の増加、運転員訓練の強化と管理制度の改善などを行なった。 [出典：ATOMICA他]

4-(3)福島第一原子力発電所事故

福島第一原子力発電所に到達した津波の大きさと浸水状況



福島第一原子力発電所の事故概要

②地震後の津波襲来により電源全喪失。安全系冷却ポンプが作動できず、冷却機能喪失した。

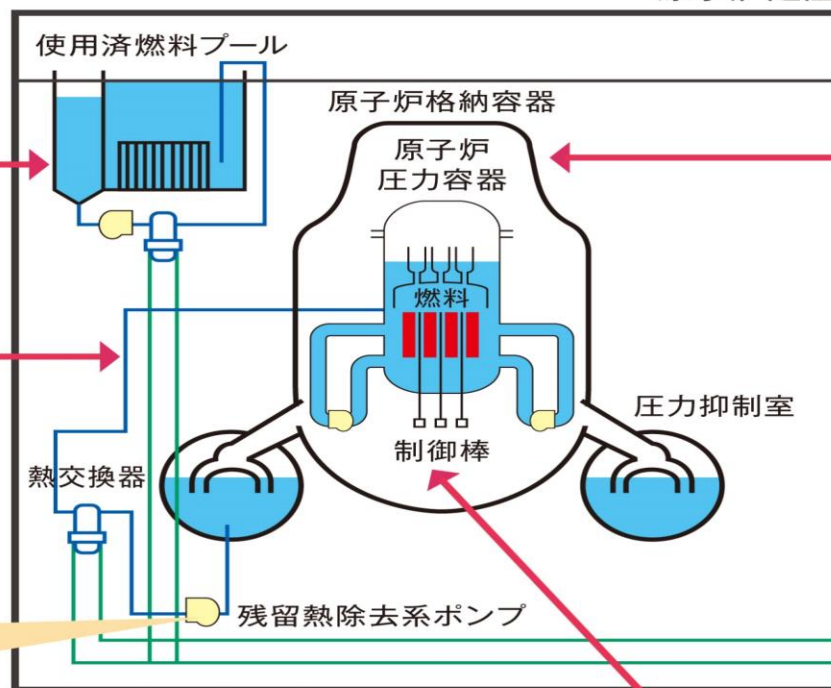
冷やす 
原子炉水や使用済燃料プール水の温度を下げ、低温に維持する

原子炉や使用済燃料プールを冷却するためのポンプの電源が喪失したことにより、「冷やす」機能を喪失

①地震発生に伴い即座に原子炉停止した

核分裂反応を起こす中性子の働きを抑制するための制御棒をすべて挿入して、原子炉を停止させる

原子炉建屋



③炉心溶融し、原子炉圧力容器内で水素ガス大量発生

閉じ込める 
放射性物質が外部に出ないようにする

④格納容器の閉じ込め機能が不十分

燃料の損傷、水素爆発による原子炉建屋破損など、「閉じ込める」機能を喪失

⑤水素ガスが原子炉建屋内に流出し、水素爆発

補足：福島第一原子力発電所事故概要

①発生日：2011年3月11日

②場所：福島県福島第一原子力発電所

③事故経過：

- ・東北太平洋沖の巨大地震で原子炉が自動停止した後、襲来した巨大津波によって電源設備が壊滅的な打撃を受け、全電源喪失となり、冷却機能の喪失を招いた。また、直流電源も喪失し、監視手段がなくなった。
- ・手探り状態で回復操作を試みたが、炉心で発生した水素が格納容器から外に漏れ、原子炉建屋内で水素爆発を生じ、建屋が損壊した。（現在の残留燃料の発熱量は極小）

④環境影響：セシウム 約 1.5×10^{16} Bq、ヨウ素131 約 2×10^{17} Bq

チェルノブイリ事故に比べて、セシウムやヨウ素131の放出量はおおよそ1/5の少なさである。
一般人の被ばく量は、最高約23mSv程度に収まっている。

⑤事故原因：巨大津波による全電源系の機能喪失が主な原因である。

⑥教訓：シビアアクシデント対策の義務化等を含む新規制基準の策定

[出典：ATOMICA他]

5. 本日のまとめ

- ・ 自然や環境の脅威を厳しく予測し適切に対処することで、過酷な事故を未然に防ぐことができる。また、環境汚染リスクも大幅に低減される。
- ・ 原子力エネルギーは密度が高く、長く安定してエネルギーを取り出すことができ、安定したエネルギー源となる。
- ・ 原子力エネルギーの平和利用には高度な科学技術が必要であるが、技術立国の日本にとって、技術力を高めながら世界に貢献できる最適な技術といえる。（講演者意見）