

H30年度 長岡技術科学大学対話会

## 原子力の安全確保の考え方

日本原子力学会シニアネットワーク連絡会会員

大野 崇

(元三菱重工)

平成30年6月20日

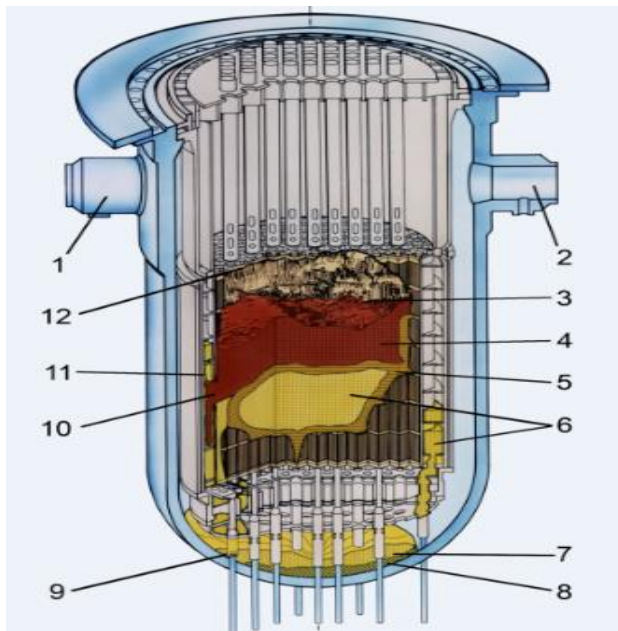
# 今日お話ししたいこと

- これまでも巨大システムは事故を起こしている  
～事故事例と原因～
- その安全確保の考え方は  
～巨大システムの安全設計思想と原子力の深層防護思想～
- 福島事故を受け新規制基準は何を要求したのか  
～具体的にどういう安全対策強化を行ったのか～
- 米国では何を要求したのか

# スリーマイルアイランド原子力発電所事故



- 1979年3月 米国ペンシルバニア州 Harrisburg 市スリーマイル島(TMI)原子力発電所2号炉で発生
- 制御用空気系故障で主給水ポンプが停止しタービンが自動停止。原子炉1次系の温度圧力が上昇し加圧器逃し弁が自動作動。原子炉は蒸気発生器(SG)水位低で自動停止し1次系圧力が低下し閉まるべき加圧器逃し弁が開固着し1次冷却材が喪失した。この時1次系内で局所的減圧沸騰が生じ加圧器水位を押し上げたことから1次冷却材量がありすぎと誤判断してECCS1台を停止し2台の流量を減らした。この結果、炉心の2/3が露出して一部燃料が溶融した。
- 約8km以内の幼児と妊婦に退避勧告(一部実避難)
- 原因:
  - ・人為ミス(補助給水ポンプ出口弁閉止ランプ隠れ、水量誤認によるECCS停止と間欠作動、1次冷却材ポンプ停止)
  - ・機械故障(加圧器逃し弁開固着)
  - ・設計ミス(格納容器隔離弁隔離設計)



- 1.冷却材配管入口
- 2.冷却材配管出口
- 3.空洞部
- 4.上部デブリベッド
- 5.クラスト
- 6.溶融酸化物質
- 7.下部プレナムデブリ
- 8.炉内計装案内管
- 9.損傷した計装案内管
- 10.バツフル板に開いた穴
- 11.コアフォーマ部内表面に付着した物質
- 12.上部炉心板の損傷

# インドボパール化学工場事故



- 1984年12月 インドマッデイヤブラデーシュ州ボパールで発生
- 農薬中間原料の毒性の強いイソチアソ酸メチル(MIC)が異常な重合反応を起こしタンクに亀裂が入り環境へ大量に漏えい
- 死者約3400人、負傷者約20万人
- 原因:
  - MICの異常な重合反応
  - 事故防止あるいは事故拡大防止システムの欠如
  - 人的問題(従業員のモラル低下、安全マニュアルの無視)

# 日航機墜落事故



- 1985年8月 日本航空123便(B-747)が群馬県多野郡上野村御巢鷹の尾根に墜落
- 金属疲労により後部圧力隔壁が損壊し、機体尾部と垂直尾翼が破壊され操縦機能が喪失
- 520名が死亡
- 原因:
  - 7年前に起きたしりもち事故の修理の際の上下隔壁板の接続く強度不足(リベット2列→1列)
  - 定期点検で発見できなかった
  - 航空基準に与圧構造損壊に対するフェールセーフ設計要求がなかった

# チャレンジャー号爆発事故



- 1986年1月 米国フロリダ州ケネディ宇宙センターでチャレンジャー号打ち上げ時に発生
- 右側固体燃料補助ロケット(SRB)の燃焼ガスが低温で硬化したリング部から漏れたことが原因でSRBがはずれ、軌道船に過度な負荷が加わって空中分解
- 7名の乗組員が死亡
- 原因:
  - 低温下におけるリングの設計の欠陥を把握しながら修正せずに放置(握り潰し)
  - 現場技術者の指摘を無視して打上げを決行(意思決定過程に深刻な瑕疵)

# チェルノブイリ原子力発電所事故



- 1986年4月 ソ連ウクライナ共和国キエフ市のチェルノブイリ原子力発電所4号炉(黒鉛減速沸騰軽水炉圧力管型)で発生
- 外部電源喪失によりタービンへの蒸気供給が停止された場合、惰性で回っているタービン発電機からの電力で非常用炉心冷却系設備のポンプ等をどの程度動かすことができるかを確認する試験の最中において、**原子炉**出力が急激に増大し、これを抑えることができず、燃料チャンネル及び原子炉上部の構造物が破壊され、燃料及び**黒鉛**の一部が飛散し、原子炉建屋も破壊され大量の放射性物質が環境へ放出された。
- 死者31名、30km圏内の住民135万人が避難
- 原因:
  - 設計上の欠陥(自己制御性、閉込機能)
  - 運転規則違反
  - 政治的隠ぺい体質(設計上の脆弱性、事故発生 の非公表)

# JCO臨界事故



- 1999年9月 茨城県東海村(株)JCOの燃料加工施設で発生
- 「常陽」の燃料製造に用いる濃縮度18.8%、濃度380gU/リットルの硝酸ウラニル溶液を製造中に事故が発生。臨界にならないように溶解塔を用いてかつ小分けして濃縮ウランを溶解すべきところ、ステンレス容器を用いて一度に溶解させ、それを混合均一化させるため沈殿槽に注入した時に臨界が発生。使用した沈殿槽が中性子が逃げにくい形状で回りを水ジャケットで覆われていたため臨界となった。
- 死者2名 被爆者664名
- 原因:
  - ・法律違反(国に承認された設備・手順を無視)
  - ・安全管理体制不在(作業手順・指示書改訂の承認体制なし)



# 福島第一原子力発電所事故

〔3月15日(火)〕福島第一原発の(手前から)1号機、2号機、3号機。白煙の奥の白い壊れた壁が4号機=15日午前7時33分、東京電力提供



- 2011年3月11日 福島県双葉郡大熊町と双葉町に跨る東京電力福島第一原子力発電所の1~3号機で発生
  - 東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)の影響で外部電源が喪失し、さらに津波が浸水し非常用の交流及び直流電源が使えなくなり、原子炉が冷却できずに炉心が溶融。1、3、4号炉で水素が爆発し原子炉建屋が破壊されるとともに1~3号炉から大量の放射性物質が外部環境へ放出された
  - 直接死ゼロ、20km圏内:強制避難、20km圏外:20mSv/年以上の区域で順次避難(計11万3千人)
  - 原因:
    - ・規制の虜(監視・監督機能の崩壊)
    - ・安全軽視の経営姿勢(規制以上の安全対策を行わない)
- 等

# 今日お話ししたいこと

- これまでも巨大システムは事故を起こしている  
～事故事例と原因～
- **その安全確保の考え方は**  
**～巨大システムの安全設計思想と原子力の深層防護思想～**
- 福島事故を受け新規制基準は何を要求したのか  
～具体的にどういう安全対策強化を行ったのか～
- 米国では何を要求したのか

# 巨大システムの安全基本設計思想

- フォールトトレランス  
システムの一部に問題が生じても全体が機能停止することなく動作し続けるようにシステムを設計する。  
例：航空機の設計→多重の安全装置を持たせ事故発生を防止
- フェールセーフ  
事故や誤りが生じた際は機械やシステムを安全な方向に導く  
例：新幹線の設計→事故や地震時車両を停止させる
- ディフェンスインデプス（深層防護）  
1つの防護レベルが破れた時に次の防護レベルで防護。  
例：原子力の設計→5層の防護レベルにより人と環境を放射性物質の影響から護る。（異常発生防止→異常拡大・事故への進展防止→環境への放出防止→シビアアクシデント進展防止→防災）

# リスクと深層防護との関係

想定し得る様々な事象を考慮するため、リスク概念を導入し、頻度に応じた対策をとる  
(高頻度低影響から低頻度高影響まであらゆる領域を考慮)

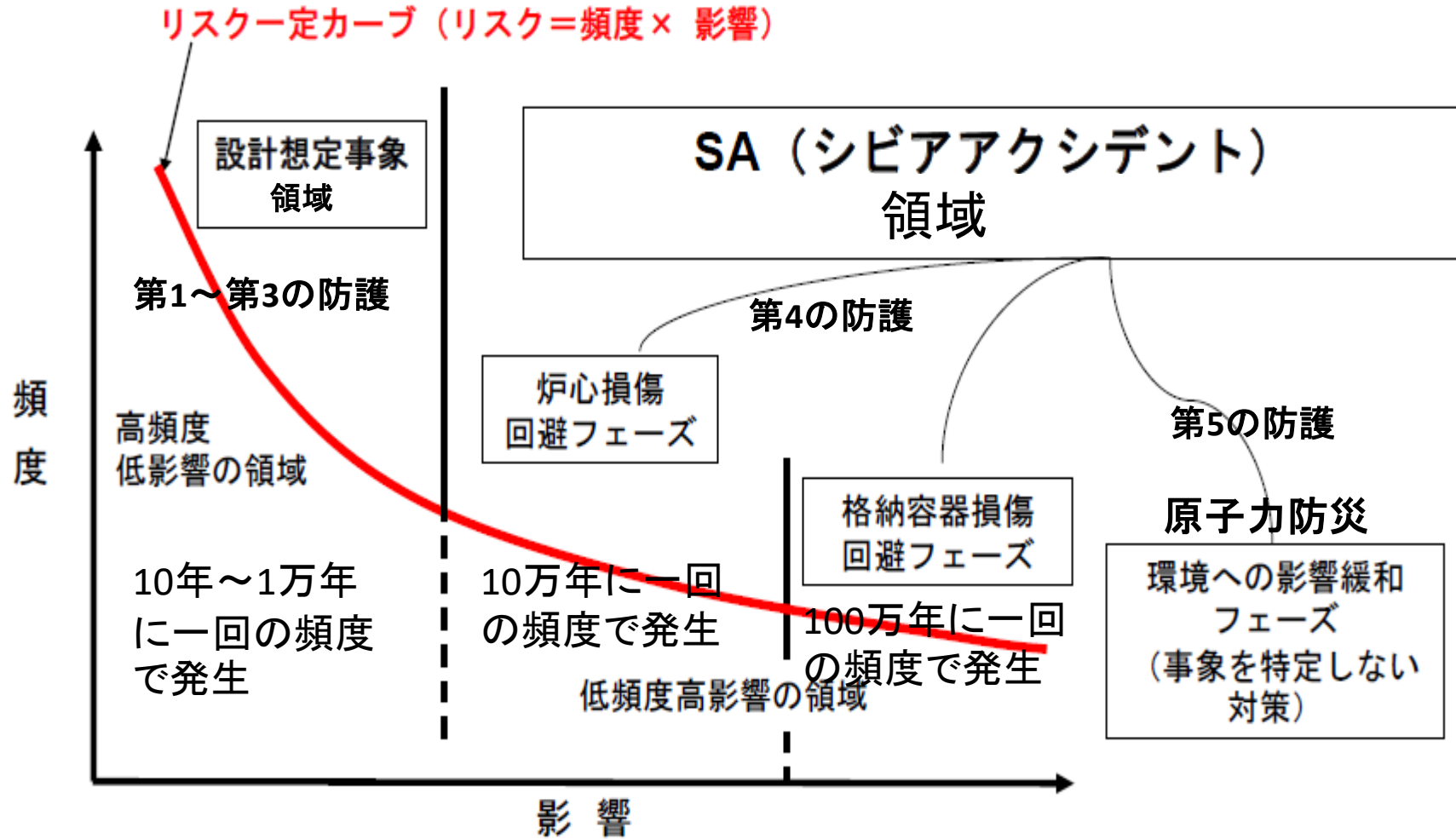


表1 身近な社会リスク  
(個人の死亡率(1/年))

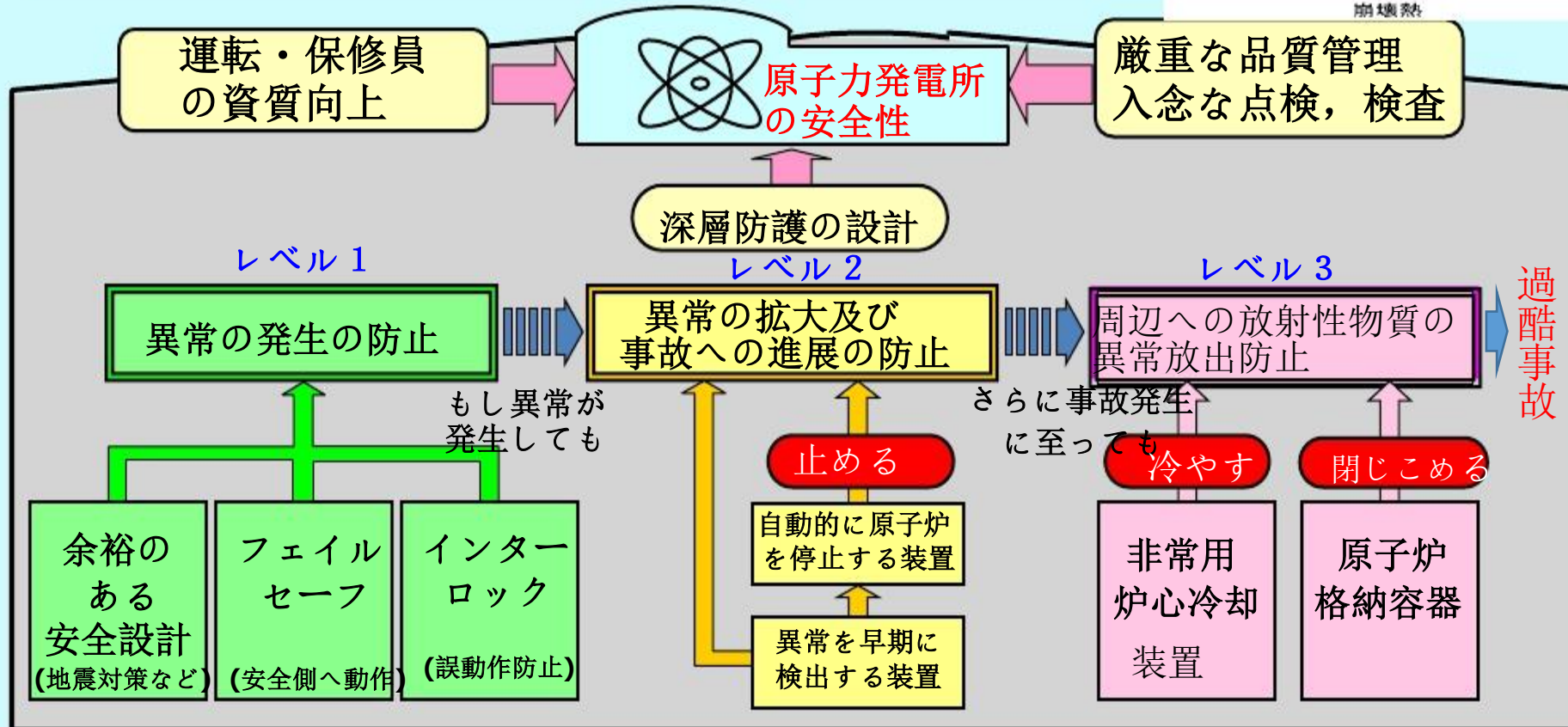
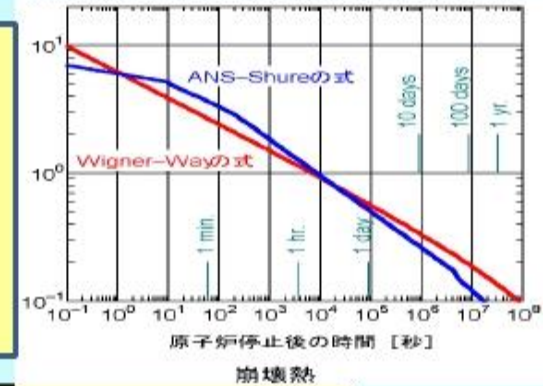
全死亡率	$1.0 \times 10^{-2}$
疾病合計	$8.0 \times 10^{-3}$
悪性新生物(がん)	$3.0 \times 10^{-3}$
自殺	$1.8 \times 10^{-4}$
交通事故	$6.4 \times 10^{-5}$
転倒・転落	$4.5 \times 10^{-5}$
他殺	$2.5 \times 10^{-6}$
<b>原子力安全目標</b>	<b><math>10^{-6}</math></b>

# 第1～第3の深層防護

## ・原子力の特徴

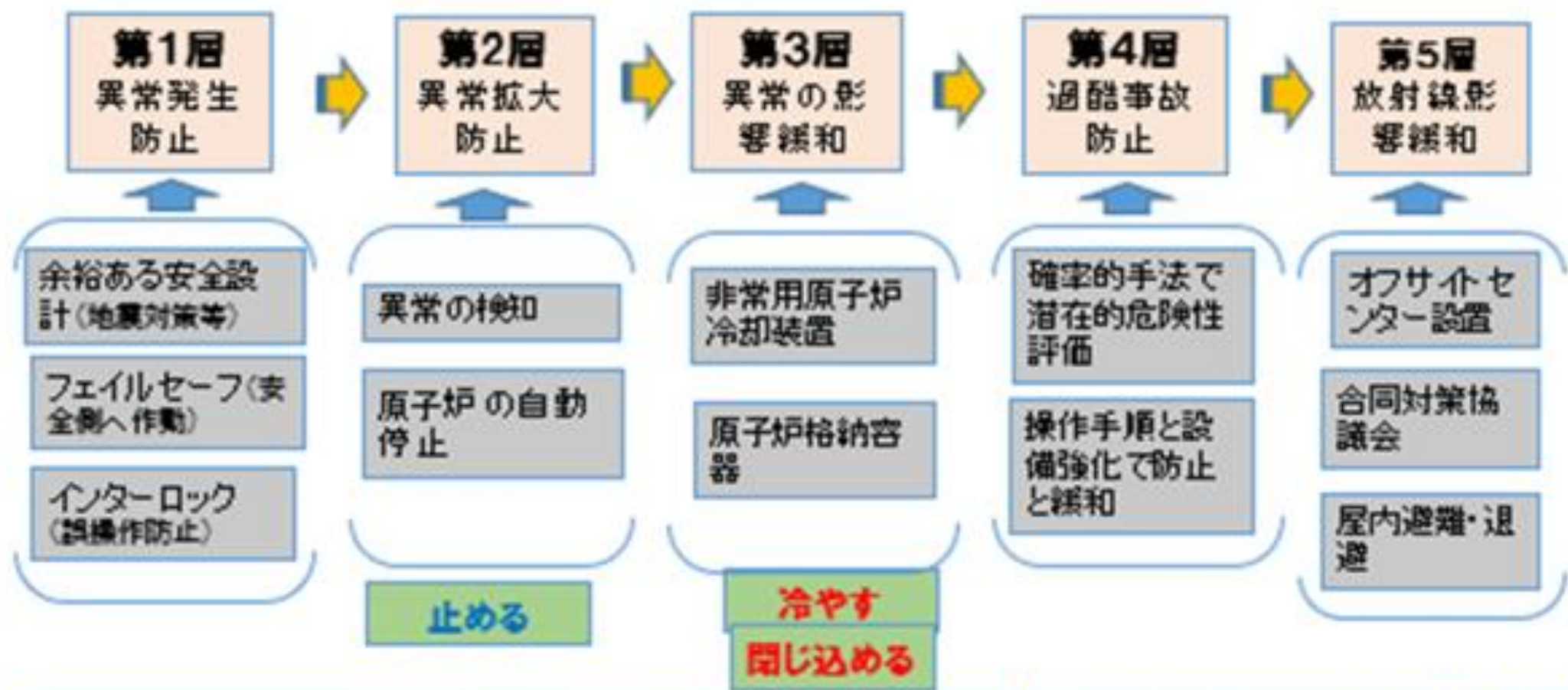
- ・原子炉を止めても発熱（崩壊熱）があり、冷却しなければならない。
- ・大量の放射性物質を如何なる際にも閉じ込めなければならない。
- ・高レベルの放射性廃棄物を最終処分（深地層処分）しなければならない。
- ・**深層防護の設計思想を確立し、安全を確保する。**

原子炉熱出力に対する割合【%】



# 第1～第3の深層防護(2)

深層防護	防護策
<b>第1の防護</b> 異常発生 の防止	<p>(1) 原子炉の固有の安全性を有するように設計する(出力上昇を抑制するような方向にフィードバックがかかる設計)</p> <p>(2) 異常が発生しないように安全装置や機器は性能や品質の高い設計とする</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・余裕を持った設計とする(例耐震設計に安全尤度を持たせる)</li><li>・性能試験や寿命試験により信頼性を確認しておく</li><li>・フェールセーフ設計を採用する(例電源等の駆動源が喪失した場合にシステムが安全側の方向に作動する設計)</li><li>・フルプルーフ設計を採用する(例制御棒の過剰引き抜きを防止するインターロックを設ける)</li><li>・安全システムは多重・多様・独立設計とする</li><li>・定期的に保守・点検を行う。また、行えるように設計する</li></ul>
<b>第2の防護</b> 異常の拡大 防止	異常が発生した場合に、出力や温度等の上昇等を早期に検知し制御棒を原子炉に挿入して緊急に停止させ異常の拡大を防止する設計とする (原子炉は異常を検知してから2～3秒で制御棒が挿入され停止する)
<b>第3の防護</b> 周辺環境への 放射性物質の 放出防止	設計基準事故が発生した場合に、原子炉を冷却して炉心溶融を防止し、放射性物質を閉じ込めて放射性物質を周辺環境へ放出しない設計とする 具体的には以下の工学的安全施設を設ける



これまでの深層防護(安全審査の対象)      今後はここまで規制対象に

(福島第一では)

原子炉の冷却に失敗、水素爆発、閉じ込めに失敗

炉心溶融、放射性物質異常放出

非常電源、冷却手段・水源の多重化、多様化必要

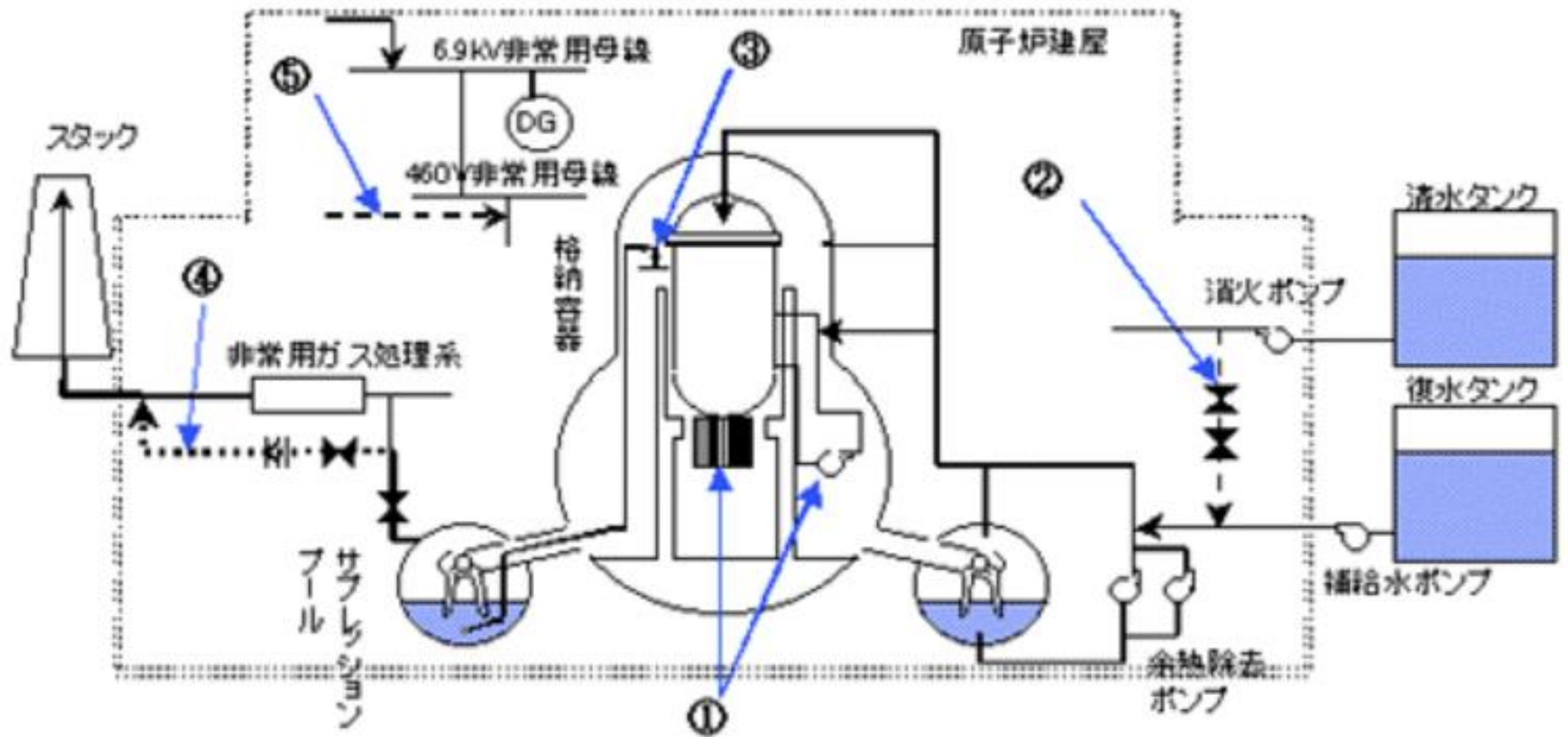
過酷事故後対策、避難計画必要



# 今日お話ししたいこと

- これまでも巨大システムは事故を起こしている  
～事故事例と原因～
- その安全確保の考え方は  
～巨大システムの安全設計思想と原子力の深層防護思想～
- **福島事故を受け新規制基準は何を要求したのか**  
**～具体的にどういう安全対策強化を行ったのか～**
- 米国では何を要求したのか

アクシデントマネジメント対策工事の概略図



BWR ①代替停止系 ②代替給水ライン ③原子炉減圧 ④格納容器フィルタードベント ⑤電力融通

# 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

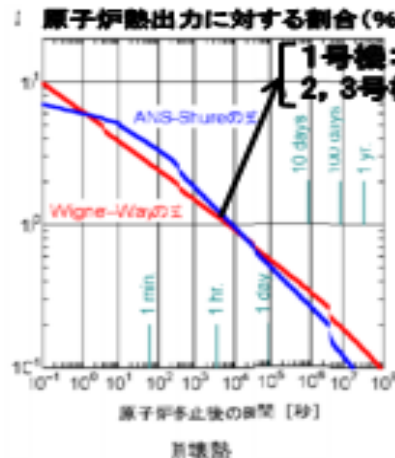
地震を感知し1、2、3号機とも直ちに制御棒が自動挿入され、原子炉停止。  
地震のために外部電源喪失、直ちに非常用ディーゼル発電機(D/G、独立2系統)作動。

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。

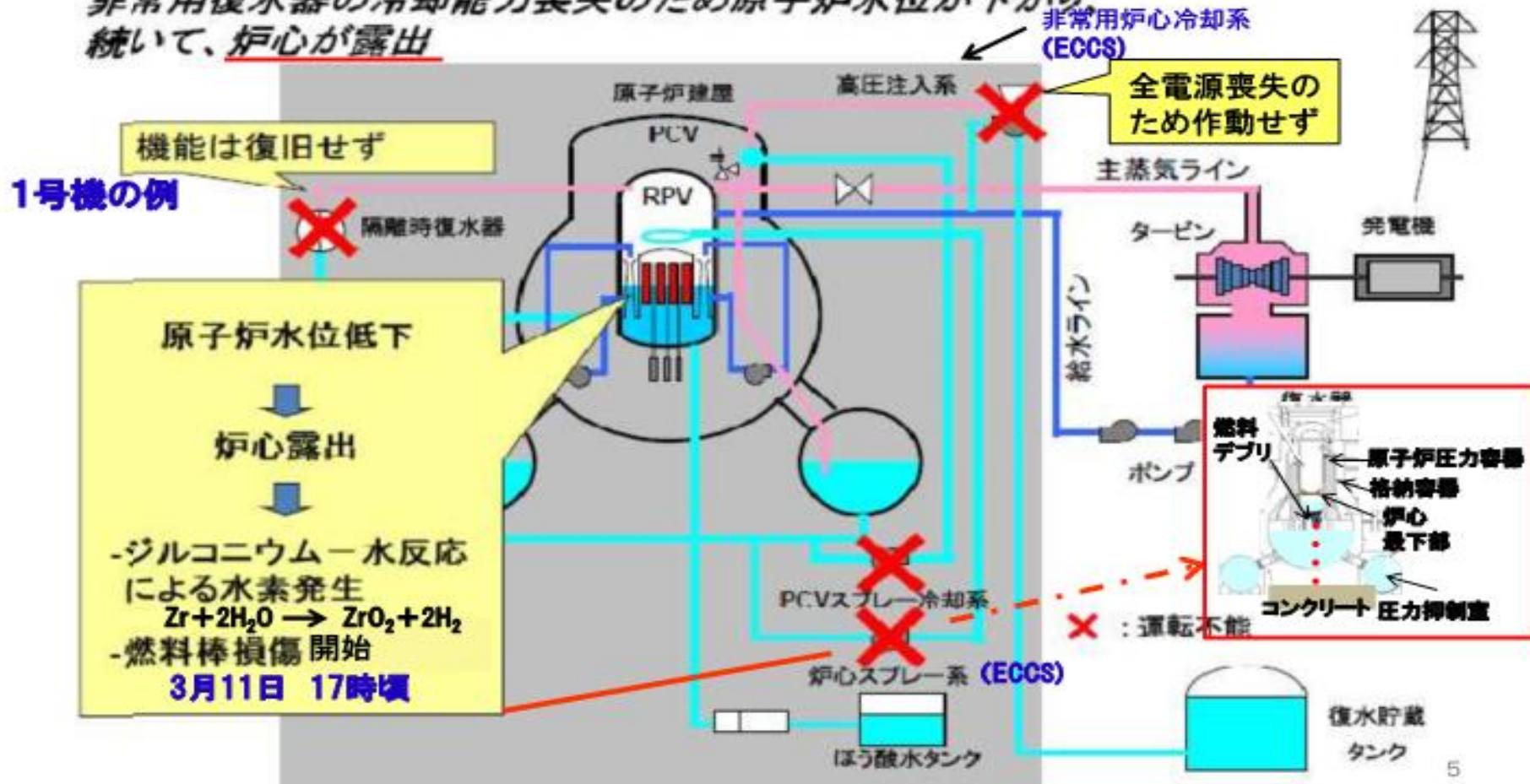
最大津波 5.7mを想定  
→ 約15mの津波襲来



# 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

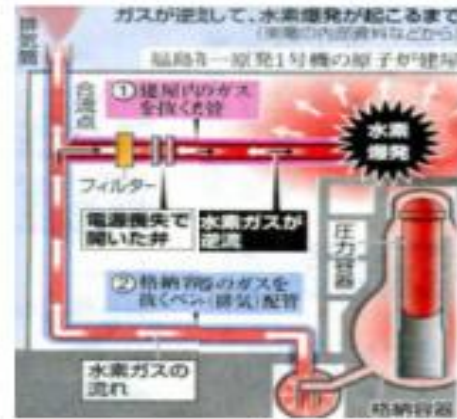
非常用復水器の冷却能力喪失のため原子炉水位が下がり、続いて、炉心が露出



# 東電福島第一発電所事故(3)

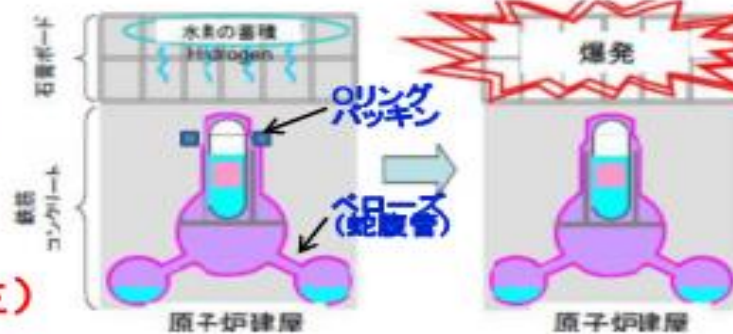
## 何故水素爆発を起こし、放射性物質を放出したか

- 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)

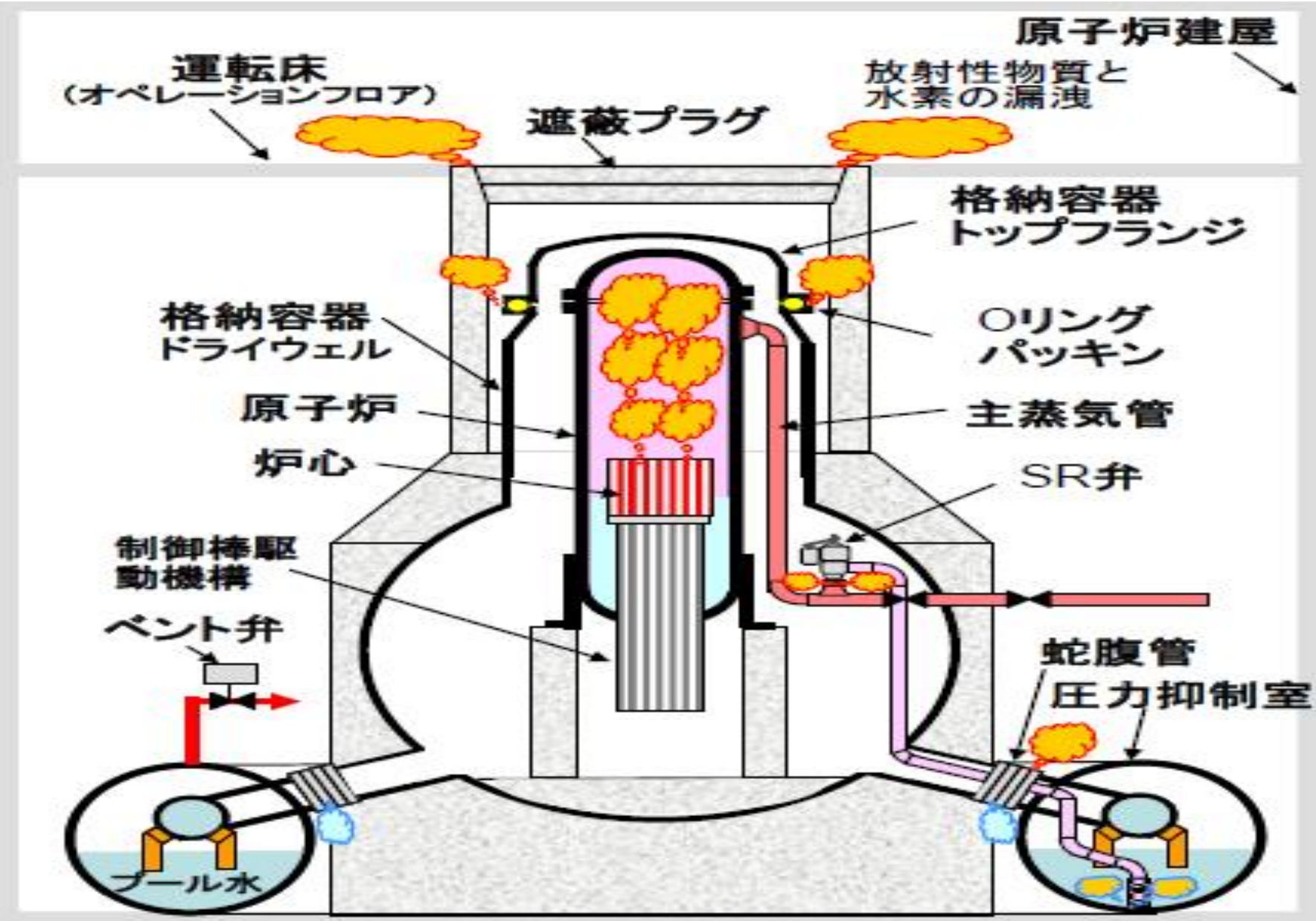


(朝日新聞より)

石膏ボード部



# 格納容器の閉じ込め機能の喪失



# 新規制基準の概要

福島第一原子力発電所事故を踏まえて施行された新規制基準では、従来の規制基準に加えて、共通要因による安全機能の一斉喪失を防止する観点から、自然現象や火災等に対処するための要求事項が新たに明記・強化されました。また、重大事故等※に対処するための要求事項等が新設されました。

※重大事故に至るおそれがある事故または重大事故  
 <基本的な考え方>

## <従来の規制基準>

- 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

## <新規制基準>

耐震・耐津波性能
自然現象等に対する考慮
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
自然現象等に対する考慮 (竜巻・火山・森林火災を明記)	
火災に対する考慮	
内部溢水に対する考慮	
電源の信頼性	
その他の設備の性能	重大事故基準
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)	
格納容器破損防止対策	
放射性物質の拡散抑制対策	
意図的な航空機衝突への対応	

- 共通要因による安全機能の一斉喪失を防止
  - ・ 自然現象の想定と対策を大幅に引き上げ
  - ・ 自然現象以外(例:火災等)でも対策を強化

- 万一の重大事故等に備えた対策を要求
  - ① 炉心損傷防止
  - ② 格納容器破損防止
  - ③ 放射性物質拡散抑制
 ⇒ それぞれの対策を施し、多段階にわたる防護措置を講じる
- テロとしての航空機衝突への対策も要求

重大事故に備えた対策  
 (電力会社の自主的な取り組み)

# 重大事故基準に係る対応について

■万一、多重に設けられた設計基準対象施設の機能が喪失したとしても、多段階にわたる防護措置を講じ、重大事故への進展と事故の拡大を防止します。

## 多段階にわたる防護措置

### 【新規制基準】

安全機能の喪失が発生したとしても炉心の著しい損傷を防ぐ

①炉心損傷防止対策  
(複数の機器の故障を想定)

対策を講じるものの炉心損傷を想定

炉心の著しい損傷が起きたとしても格納容器破損を防ぐ

②格納容器破損防止対策

対策を講じるものの格納容器破損を想定

格納容器が破損したとしても敷地外への放射性物質の拡散を抑制する

③放射性物質の拡散抑制対策

#### ■原子炉停止機能

- 原子炉代替停止系の設置

#### ■炉心冷却機能

- 原子炉高压代替注水系の設置
- 原子炉代替減圧系の設置
- 原子炉低压代替注水系の設置

#### ■原子炉格納容器の健全性維持

- 最終ヒートシンク代替熱輸送系の設置
- 格納容器代替冷却系の設置
- 格納容器過圧破損防止系の設置
- 格納容器下部注水系の設置
- 格納容器水素燃焼防止系の設置

#### ■水素爆発による原子炉建屋の損傷を防止

- 原子炉建屋水素燃焼防止系の設置

#### ■燃料プールの冷却

- 燃料プール代替冷却系の設置

#### ■発電所外への放射性物質の拡散を抑制する機能

- 可搬型原子炉建屋放水設備の設置
- 原子炉建屋ベント系の設置
- 可搬型海洋拡散抑制設備の設置

### 【共通の対策】

#### ■地震による損傷防止

- 基準地震動による地震力に対して必要な機能を維持

#### ■津波による損傷防止

- 基準津波に対して必要な機能を維持

#### ■水の供給設備

- 重大事故等の収束に必要な十分な量の水を有する水源を確保

#### ■電源設備

- 緊急時電源系を設ける  
: 常設重大事故等対処設備  
(緊急時ガスタービン発電機、直流電源設備、電源融通設備、所内電気設備)
- 可搬型重大事故等対処設備  
(交流電源車、直流電源車、可搬型蓄電池)

#### ■中央制御室

- 適切な換気設計・遮へい設計

#### ■緊急時対策所

- 放射線遮へい対策等を強化  
(福島第一原子力発電所事故相当の放射性物質の大量放出事象を想定)



# 新規制基準で求められる主な対策

**青字: 設計基準の見直し**  
**赤字: 重大事故等対策**

## 【交流電源の強化】

- ・外部電源は、独立した異なる2以上の変電所又は開閉所に接続する2回線から供給
- ・非常用ディーゼル発電機は7日間の連続運転可能

## 【緊急時対策所】

- ・免震機能等による耐震性確保
- ・福島第一原発事故と同等の放射性物質の放出があっても、居住性を確保すること

## 【想定すべき自然事象の追加】

- ・竜巻、火山、森林火災等の影響により安全性を損なわないこと

## 【格納容器の冷却・減圧対策】、【溶融炉心冷却対策】

- ・炉心を冷却するための可搬型ポンプ、大容量ポンプ車

## 【重大事故対策に必要な水源】

- ・複数の水源の確保

## 【特定重大事故等対処施設】※

- ・緊急時制御室の設置、溶融炉心冷却、格納容器冷却・減圧
- ・航空機衝突等のテロ対策

## 【敷地外への拡散抑制対策】

- ・屋外放水設備(放水砲)

## 【格納容器の冷却・減圧対策】

- ・格納容器フィルタ付ベント(BWRへの要求)

## 【原子炉停止失敗対策】

- ・原子炉停止失敗時の出力抑制設備の追加

## 【重大事故対策に必要な電源】

- ・電源車、バッテリー・3系統目の直流電源

## 【津波防護対策】

- ・防潮堤の設置や施設の高台への設置
- ・敷地内への津波流入防止

## 【水素爆発防止対策】

- ・水素濃度低減のための機器の設置
- 【熱を逃がす機能喪失時の対策】
- ・格納容器再循環ユニット等

## 【基準津波】

- ・既往最大を上回るレベルの津波を基準津波として策定

## 【活断層の認定基準の厳格化】

- ・活断層などの真上には、原子力施設の設置を禁止
- ・約12万~13万年前の活動性が明確に判断できない場合は、40万年前まで遡って評価

## 【溢水(いっすい)】

- ・安全施設は、溢水(配管やタンクが破損し、水や蒸気が漏れ出すこと)により、安全機能が損なわれないこと

## 【火災防護対策】

- ・火災により安全性を損なわないよう火災発生防止、影響の軽減等の防護対策を考慮

## 【想定される地震動のより精密な策定】

- ・三次元地下構造の把握
- ・震源を特定せず策定する地震動

※施行後5年後までに整備

## 新規制基準で強化された主な対策と例：

- ① 巨大津波が襲来しても、防潮堤と建屋防水扉により建屋を浸水から二重に防護するようにしました。（浜岡発電所の例 防潮堤：高さ22m、長さ1.6km 防水扉：厚さ80cm、重さ23トン）
- ② より大きい地震にも耐えられるように耐震工事を強化しました。（浜岡発電所の例 800カルから1200カル（3, 4号機））
- ③ すべての電源が喪失し炉心に水が注入できなくなることを想定し、高台に移動式大容量電源車等を設置しました。（川内発電所の例 移動式発電機車7台、移動式直流電源車6台）
- ④ 福島第一事故のように大事故を想定し、放射性物質の環境への放出を防ぐフィルター付きベント装置を設置しました。（柏崎発電所の例 放射性物質を千分の一以下に低減）

## 新規制基準で新たに強化されたその他の対策と例：

- ① 活断層は最大40万年前の地層まで調査（直下に活断層がないことを証明できなければ運転認めず）
- ② 航空機衝突等のテロ対策

# 今日お話ししたいこと

- これまでも巨大システムは事故を起こしている  
～事故事例と原因～
- その安全確保の考え方は  
～巨大システムの安全設計思想と原子力の深層防護思想～
- 福島事故を受け新規制基準は何を要求したのか  
～具体的にどういう安全対策強化を行ったのか～
- **米国では何を要求したのか**

# 確率論的リスク評価 (PRA)

電力中央研究所

## PRAの安全規制利用のきっかけ

### 1975年“原子炉安全研究” (NRC, WASH-1400, RSS)

- 「決定論で設定した設計基準事故よりも、苛酷事故の発生頻度が高い」

### 1979年 TMI-2事故の教訓

- 類似事故シーケンスがWASH-1400で分析されていた (小LOCA)
- 「PRAを規制活動利用のために高度化すべき」  
(ケメニー報告,カーター大統領)

### PRAを使えば、決定論よりも詳細な安全情報が得られる

- 決定論では予見できなかった安全問題が予見できる
- 安全問題の優先順位が体系的に把握できる

電力中央研究所

## 米NRCでは早くからPRAを整備

### PRAの各炉型への展開と手法の標準化 ('79-'82)

- Reactor Safety Study Methodology Application Program
- Interim Reliability Evaluation Program

### PRA手法ガイドの作成 (NUREG/CR-2300, 1983)

### 未解決安全問題への利用 (80年代前半)

- ATWSルール, SBOルール
- TMI-2アクションプランのバックフィットルール
- LERのリスク重要度判断 (条件付き炉心損傷頻度, 苛酷事故の予兆)

### 安全目標の策定 (1986)

- 個人リスク (急性) + 社会的リスク (晩発性)

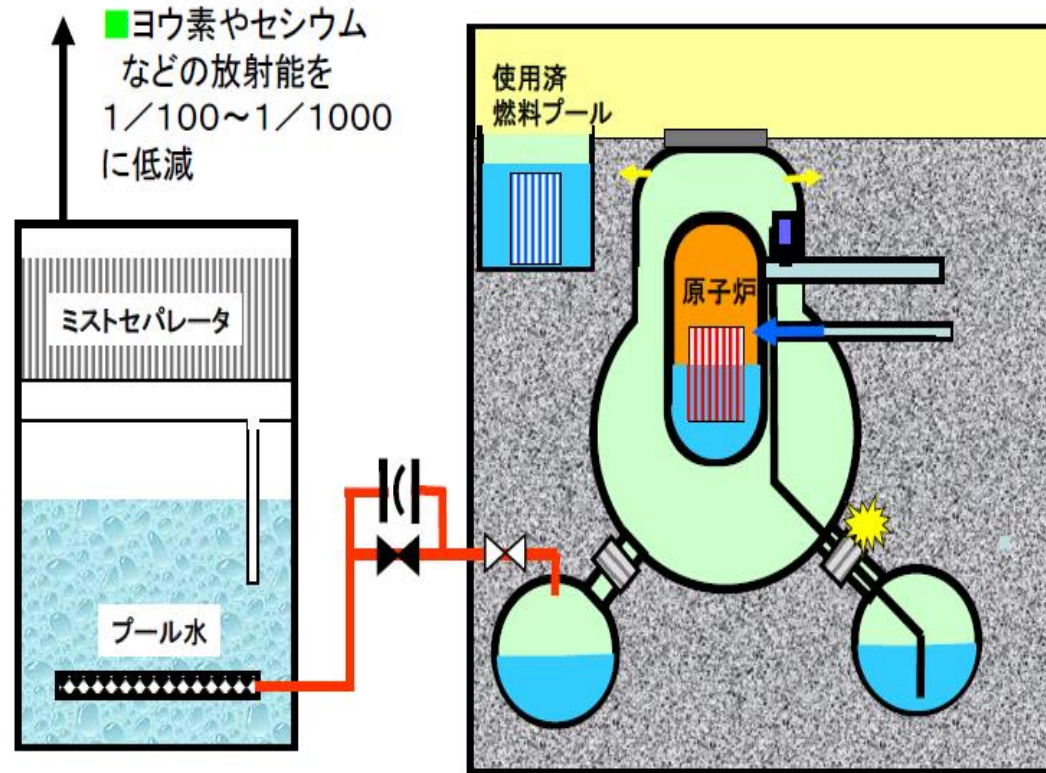
# 米国NRCの改善命令

- 設計ベース及び設計を超える外部事象に対して全交流電源喪失緩和能力を強化すること
- BWRのマーク I、II 格納容器に信頼できる耐圧ベント設計を強化すること
- 福島事故追加調査情報に基づき、格納容器或いは他の建屋における水素制御と緩和に関するNRCの知見を確認すること
- 使用済燃料プールの保給水能力とプールの計装を強化すること
- 既存する非常時手順書、過酷事故管理ガイドライン、損傷緩和ガイドライン等の発電所内の非常時対応能力を強化、統合すること

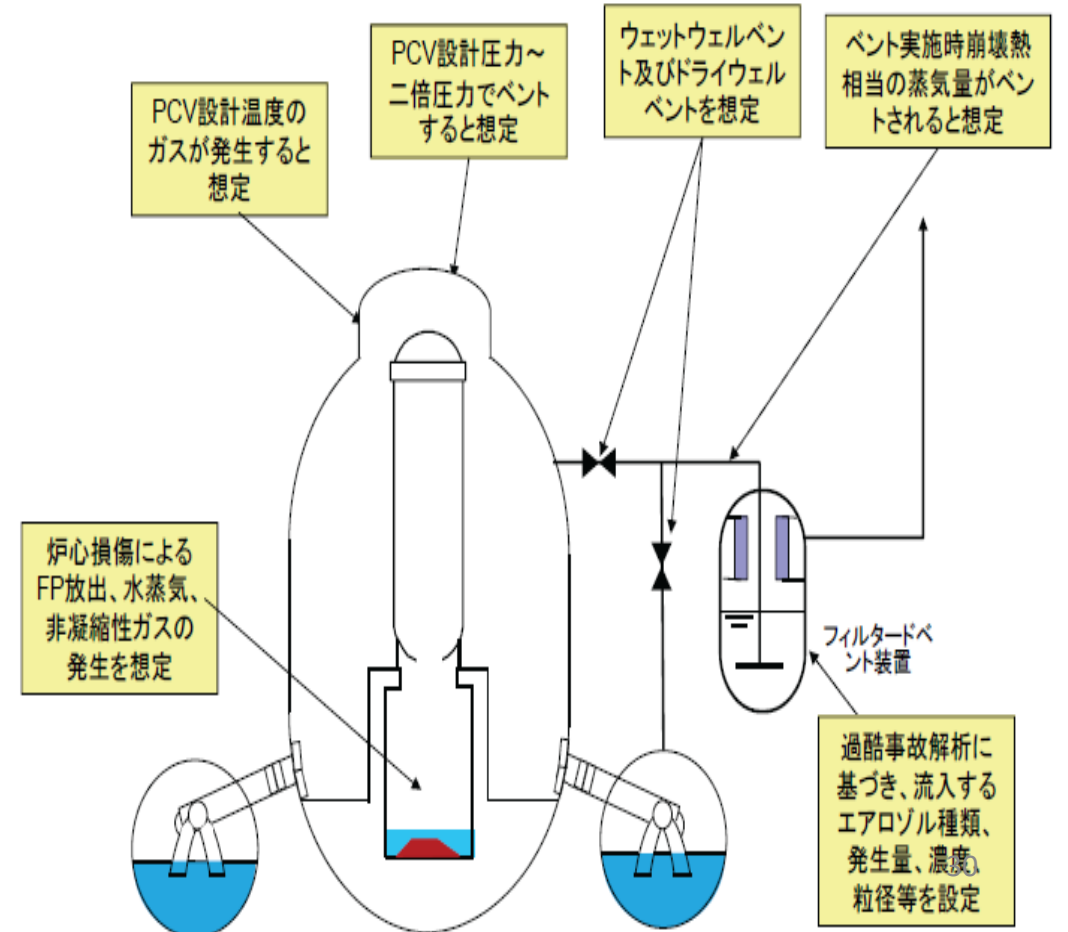
# フィルタードベント(1/2)

## ヨーロッパのフィルタードベントシステム

■チェルノブイリ事故の教訓:「例え事故が起こっても地元には迷惑をかけません」  
(フランス、ドイツ、スイス、フィンランド、スウェーデンのほぼ全ての原発に設置)



## 東京電力が考えているフィルタードベントシステム



## フィルタードベント(2/2)

- NRCスタッフは、格納容器ベントシステムについて、①現状維持 ②現行システム改善 ③フィルタードベントシステムの設置 ④シビアアクシデント時の運転要領強化 のケースについて検討し委員会に提示し、③を推奨
- NRCは、NRCスタッフ推奨のフィルタードベントの設置案③は費用対効果が薄いとして否定し、②の設備改善案をバックフィット項目として採用した。因みに、米国産業界は④を要望。
- 主要な設計改善は、シビアアクシデント条件下でも運転員がアクセスでき現場から手動操作できるようにすることにある。
- 我国の新規基準はフィルタードベントシステムを義務付けている。

ご清聴ありがとうございました！



# H30年度 長岡技科大 基調講演レジメ

タイトル:原子力の安全確保の考え方

- 巨大システムにおける事故事例
- 巨大システムの安全の考え方
- 原子力は深層防護思想が基本
- 原子力は安全対策が万全なのに何故福島事故は起こったのか
- 新規制基準は何を要求しているのか
- 具体的な安全強化対策
- 確率論的リスク評価は不可欠
- 福島事故を受けた米国NRCの改善命令
- フィルタードベントの話