

H29年度 長岡技術科学大学対話会

原子力発電所の安全対策

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29年6月21日

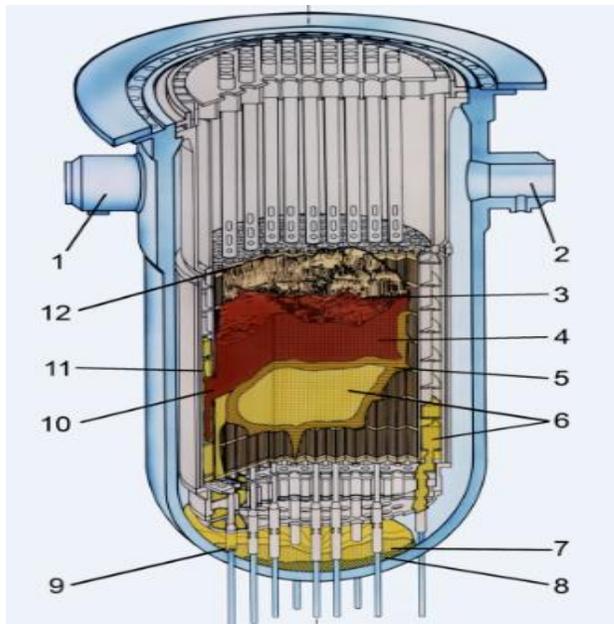
今日お話ししたいこと

- 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～
- 具体的な原子力発電所の安全設備とはどういうものか
～緊急停止系、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器～
- 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. バッフル板に開いた穴
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()従業員のマラル低下、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、慣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

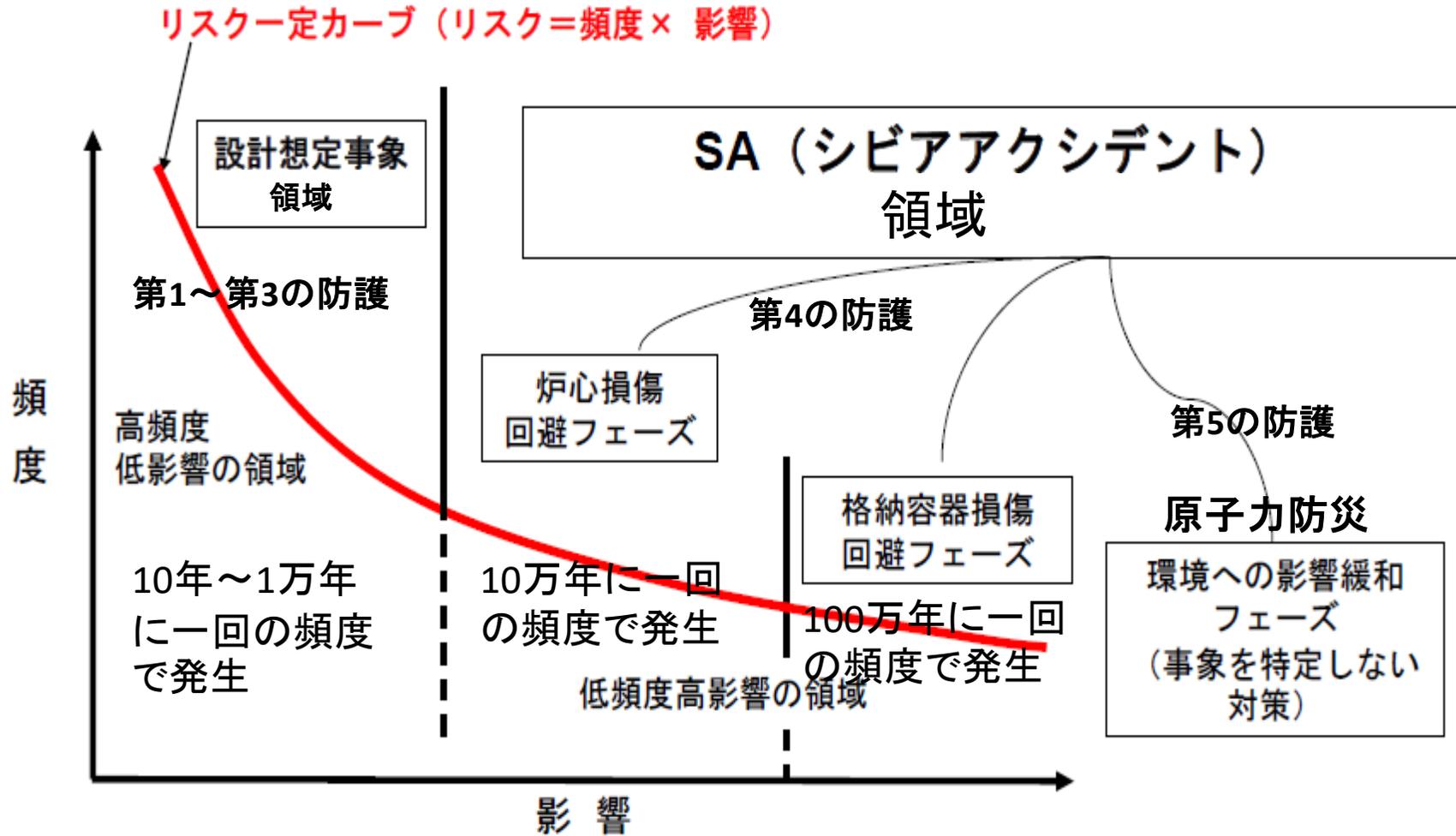
- これまでも巨大システムは事故を起こしている
～ 事故事例と原因～
- **その安全確保の考え方は**
～ 巨大システムの安全設計思想と原子力の深層防護思想～
- 具体的な原子力発電所の安全設備とはどういうものか
～ 緊急停止系、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器～
- 福島事故を受け新規制基準は何を要求したのか
- 具体的にどういう安全対策強化を行ったのか
- 米国では何を要求したのか

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

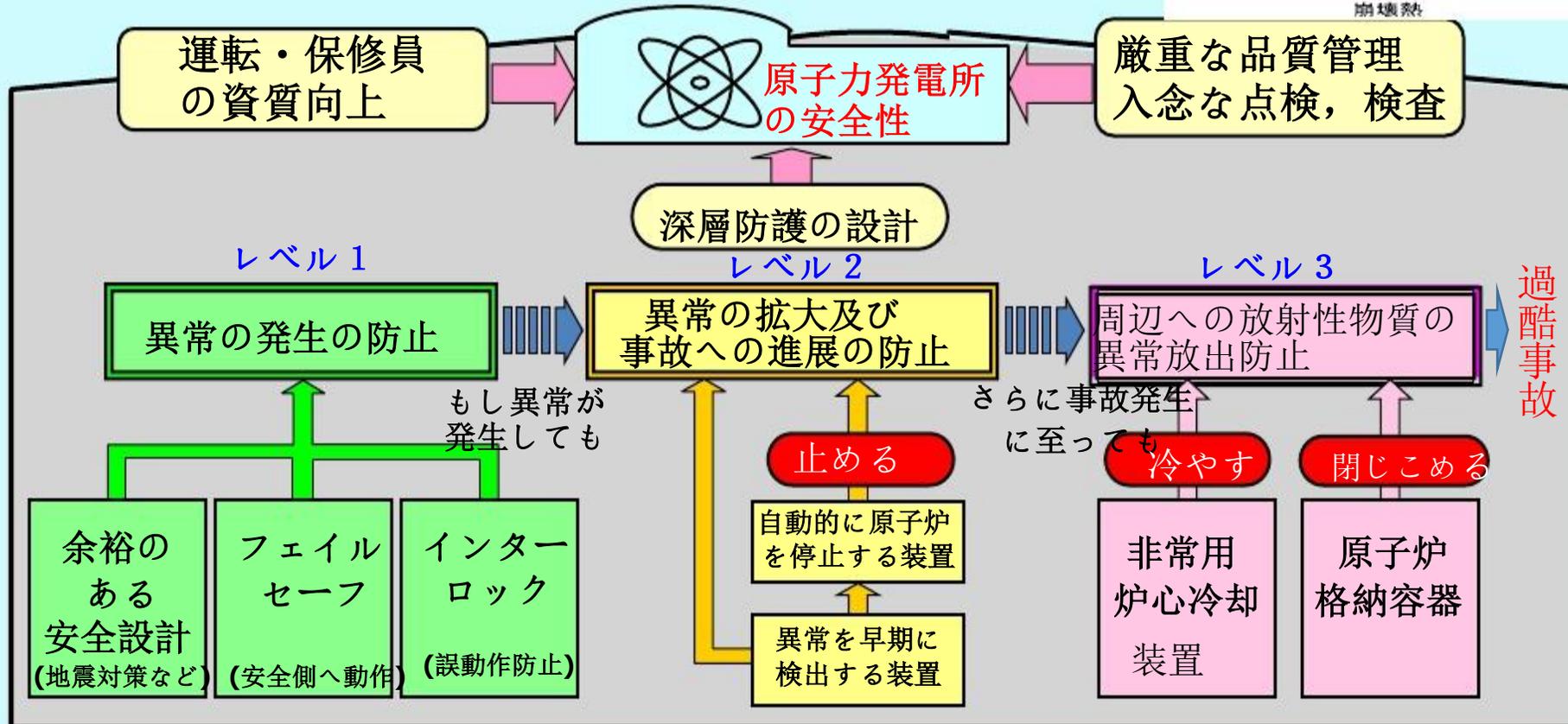
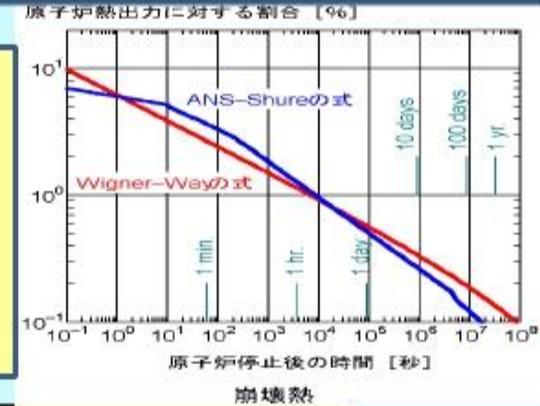
想定し得る様々な事象を考慮するため、リスク概念を導入し、頻度に応じた対策をとる
(高頻度低影響から低頻度高影響まであらゆる領域を考慮)



第1～第3の深層防護 (1)

・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。**



第1～第3の深層防護(2)

深層防護	防護策
第1の防護 異常発生防止	<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">・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)・性能試験や寿命試験により信頼性を確認しておく・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)・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)・安全系統は多重・多様・独立設計とする・定期的に保守・点検を行う。また、行えるように設計する
第2の防護 異常の拡大防止	<p>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)</p>
第3の防護 周辺環境への放射性物質の放出防止	<p>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</p> <p>具体的には以下の工学的安全施設を設ける</p> <ul style="list-style-type: none">・原子炉を冷却する非常用炉心冷却設備・放射性物質を閉じ込める原子炉格納容器及び格納容器冷却設備・原子炉格納容器から漏洩してくる放射性ヨウ素を取り除く空気浄化設備・発生した水素を結合させて取り除く可燃性ガス濃度制御設備(BWR)

今日お話ししたいこと

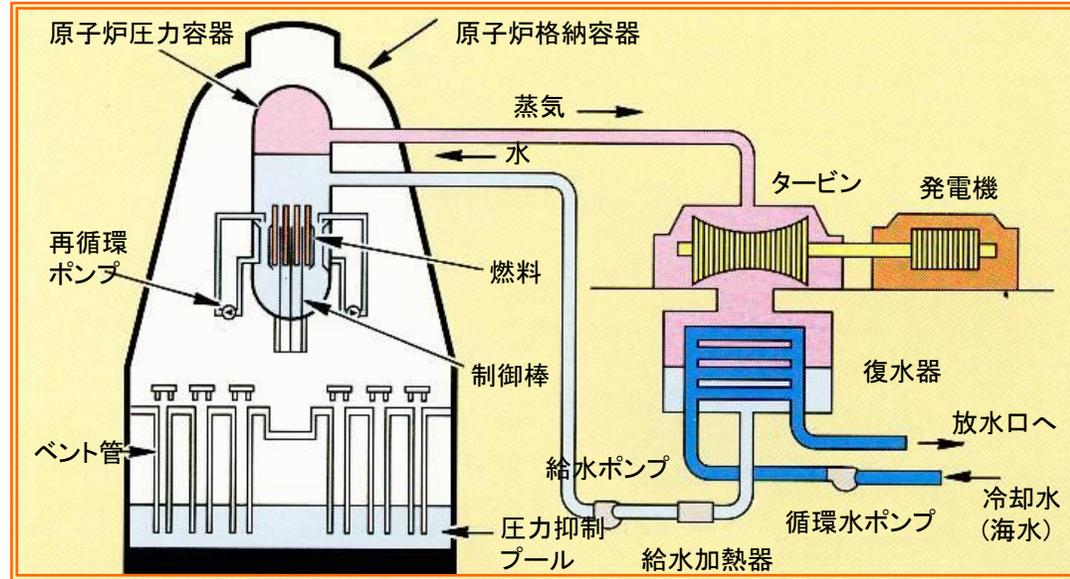
- これまでも巨大システムは事故を起こしている
～ 事故事例と原因～
- その安全確保の考え方は
～ 巨大システムの安全設計思想と原子力の深層防護思想～
- **具体的な原子力発電所の安全設備とはどういうものか**
～ 緊急停止系、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器～
- 福島事故を受け新規制基準は何を要求したのか
- 具体的にどういう安全対策強化を行ったのか
- 米国では何を要求したのか

国内の主な原子力発電所の種類

BWR

Boiling Water Reactor
(沸騰水型原子力発電所)

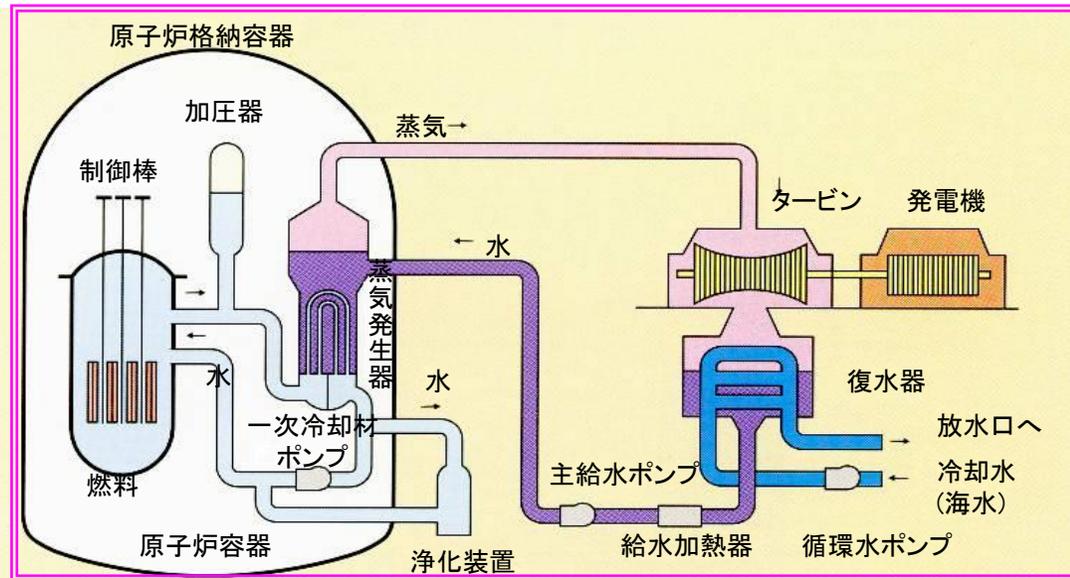
原子炉内で発生させた蒸気をそのままタービンに送ります。



PWR

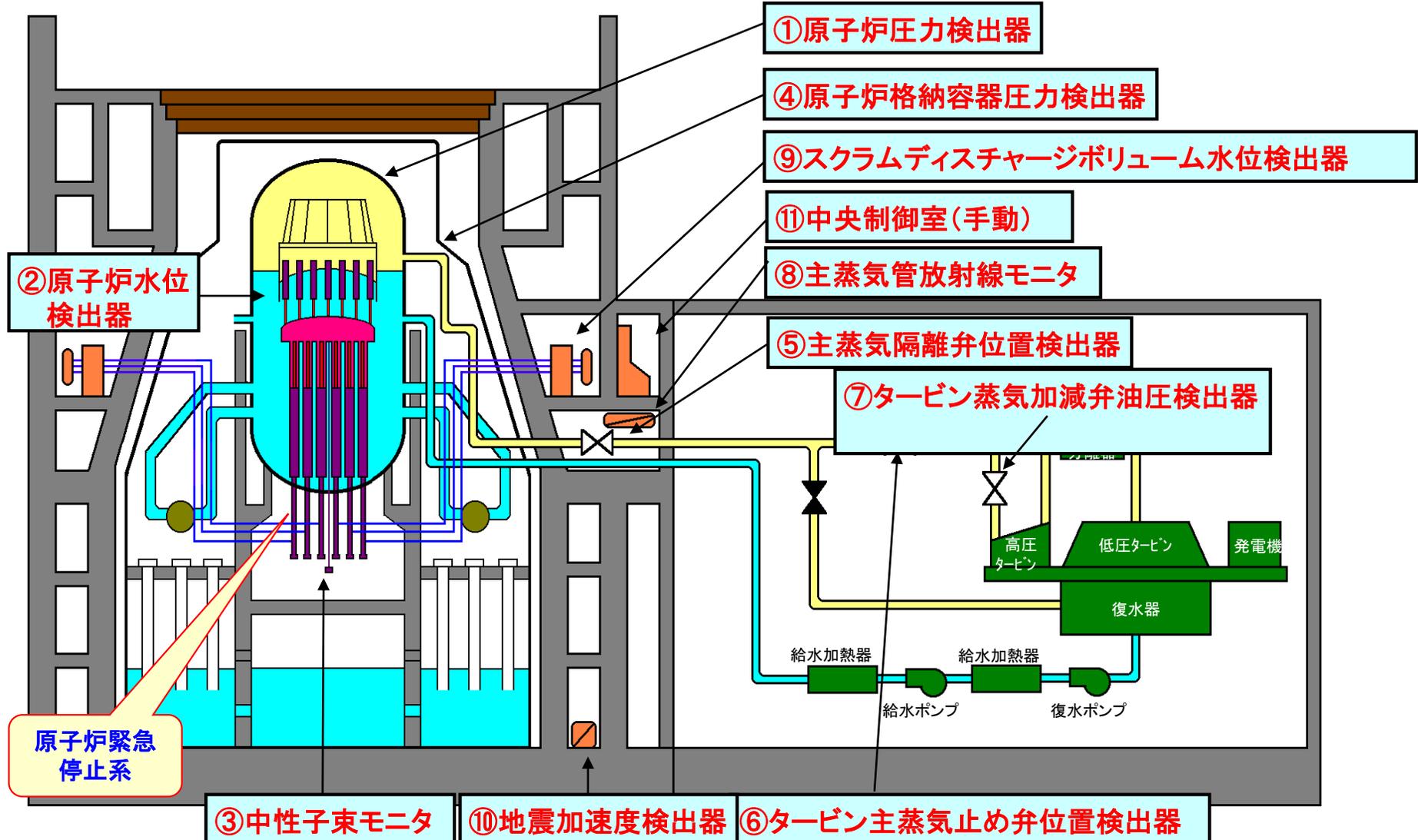
Pressurized Water Reactor
(加圧水型原子力発電所)

原子炉内で熱せられた高温・高圧の（沸騰していない）水を蒸気発生器に送り、そこで熱交換して蒸気を発生させタービンに送ります。



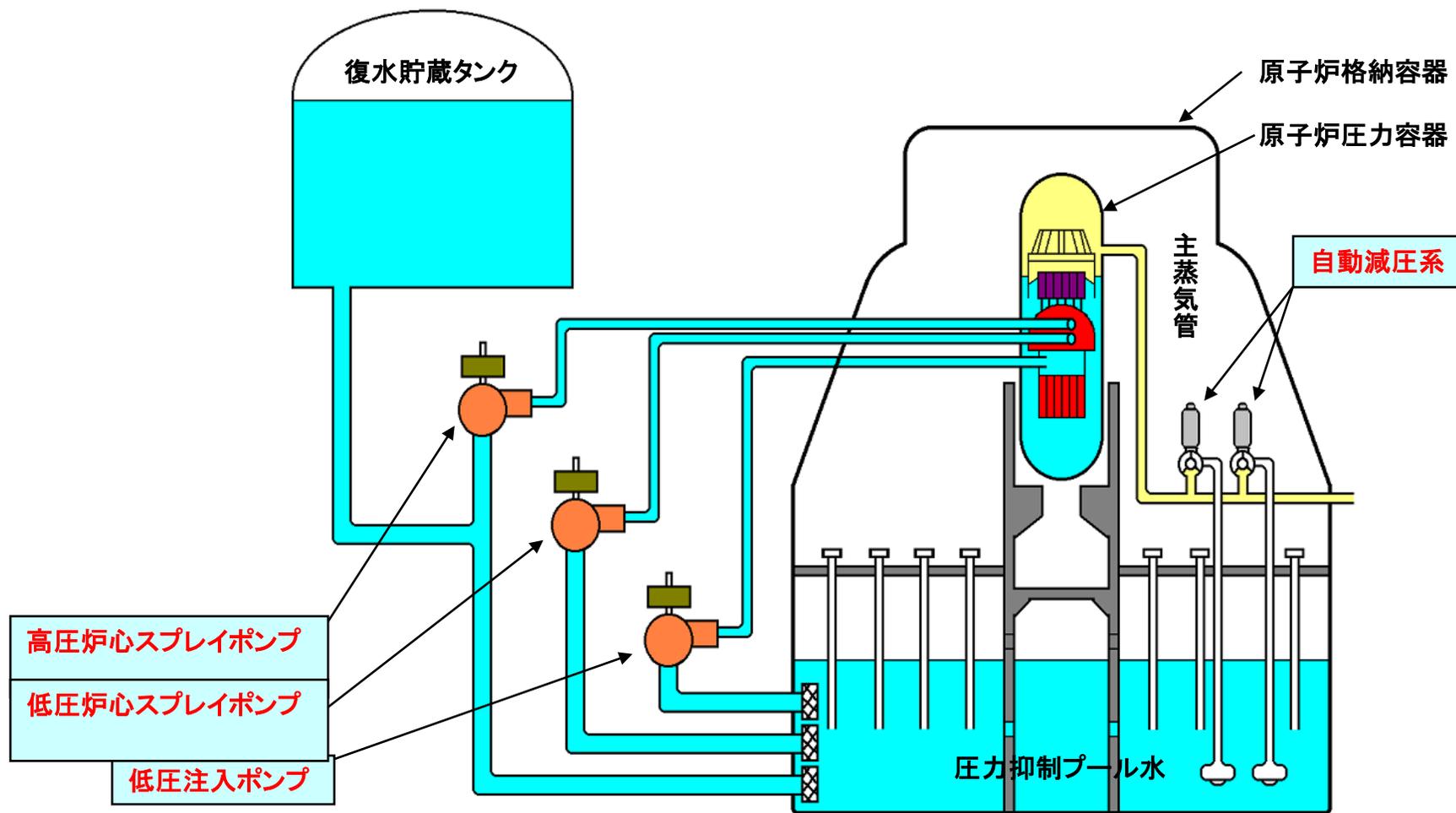
BWR 原子炉緊急停止系

止める



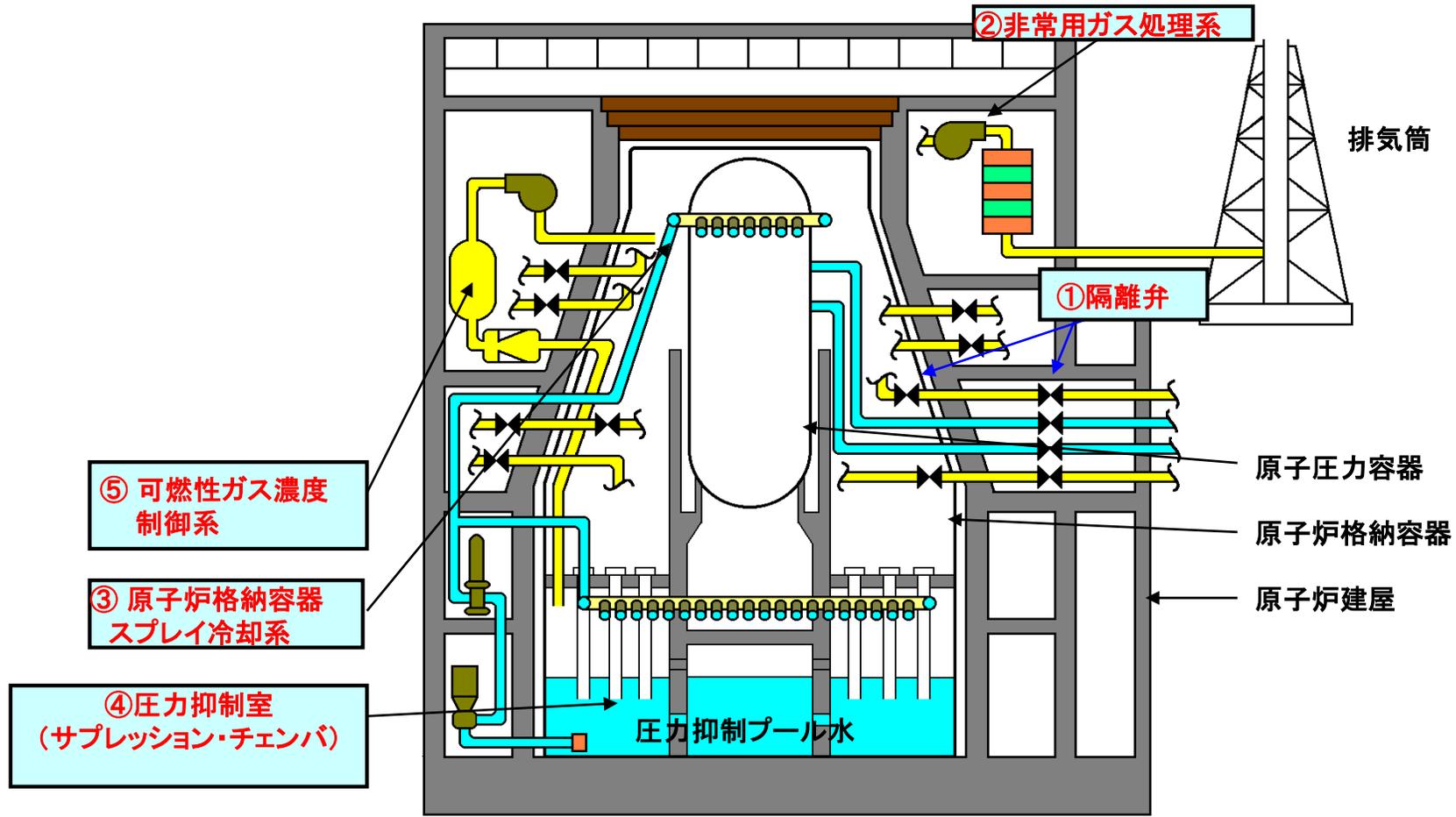
BWRの非常用炉心冷却系

冷やす



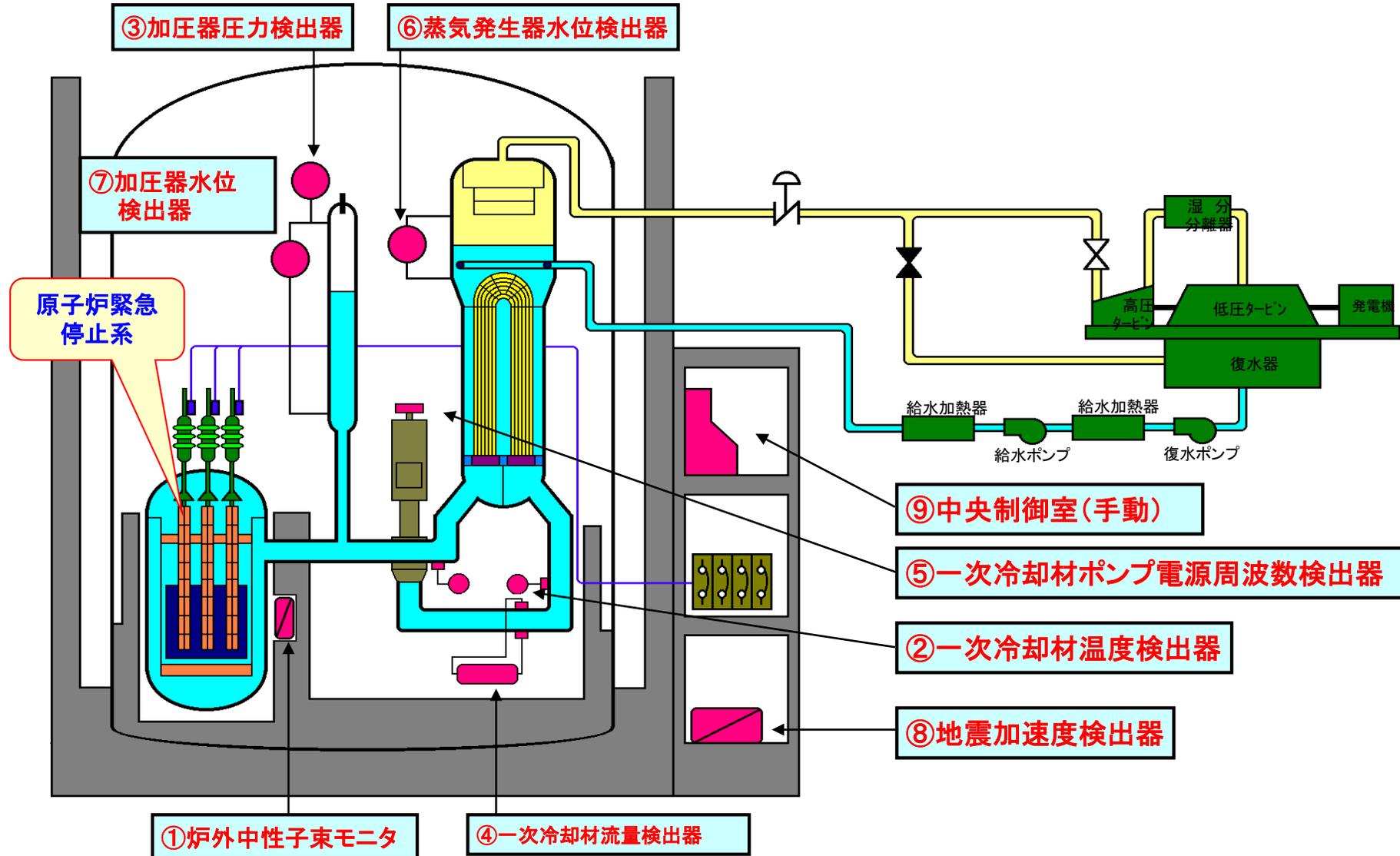
BWRの原子炉格納容器

閉じ込める



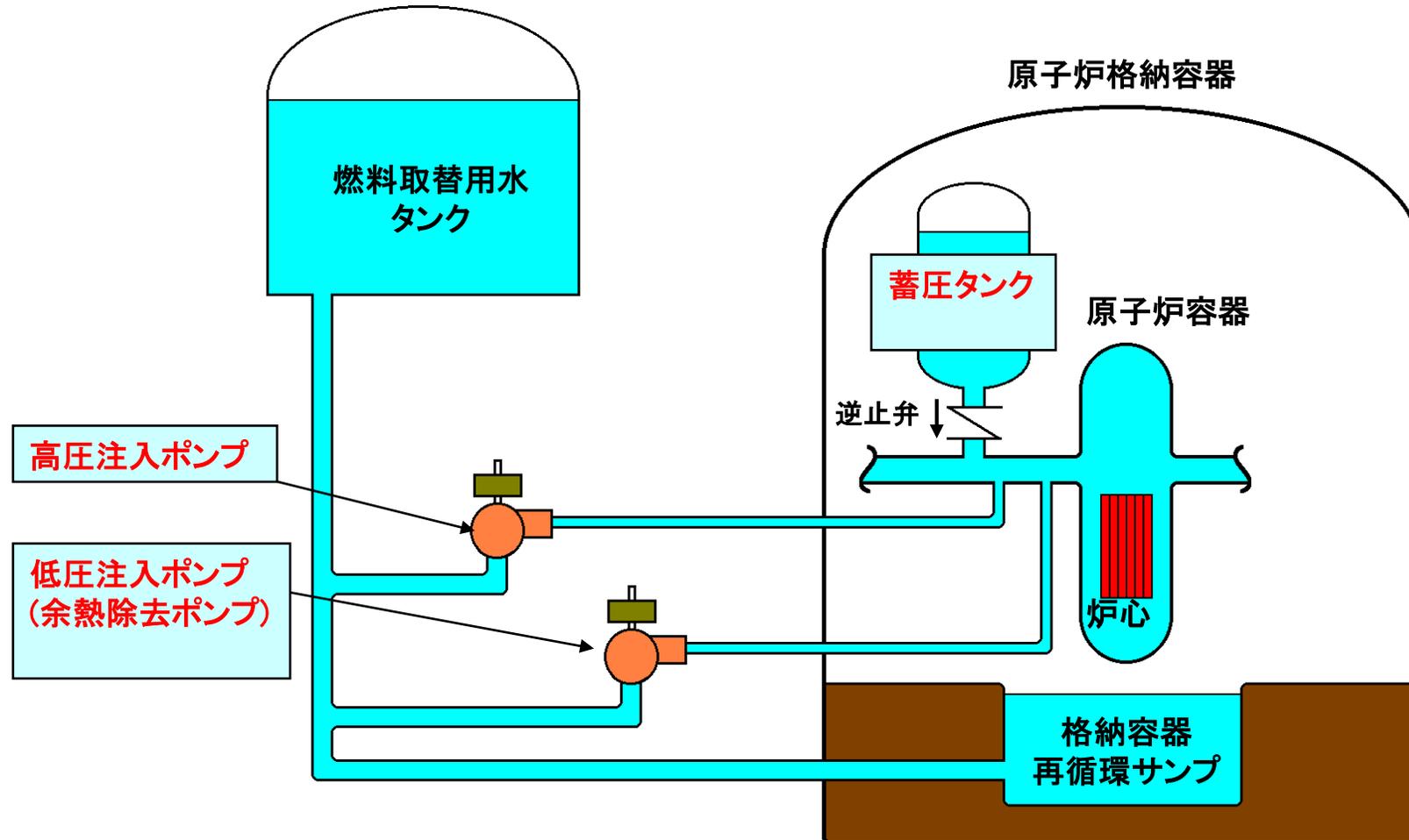
PWR 原子炉緊急停止系

止める



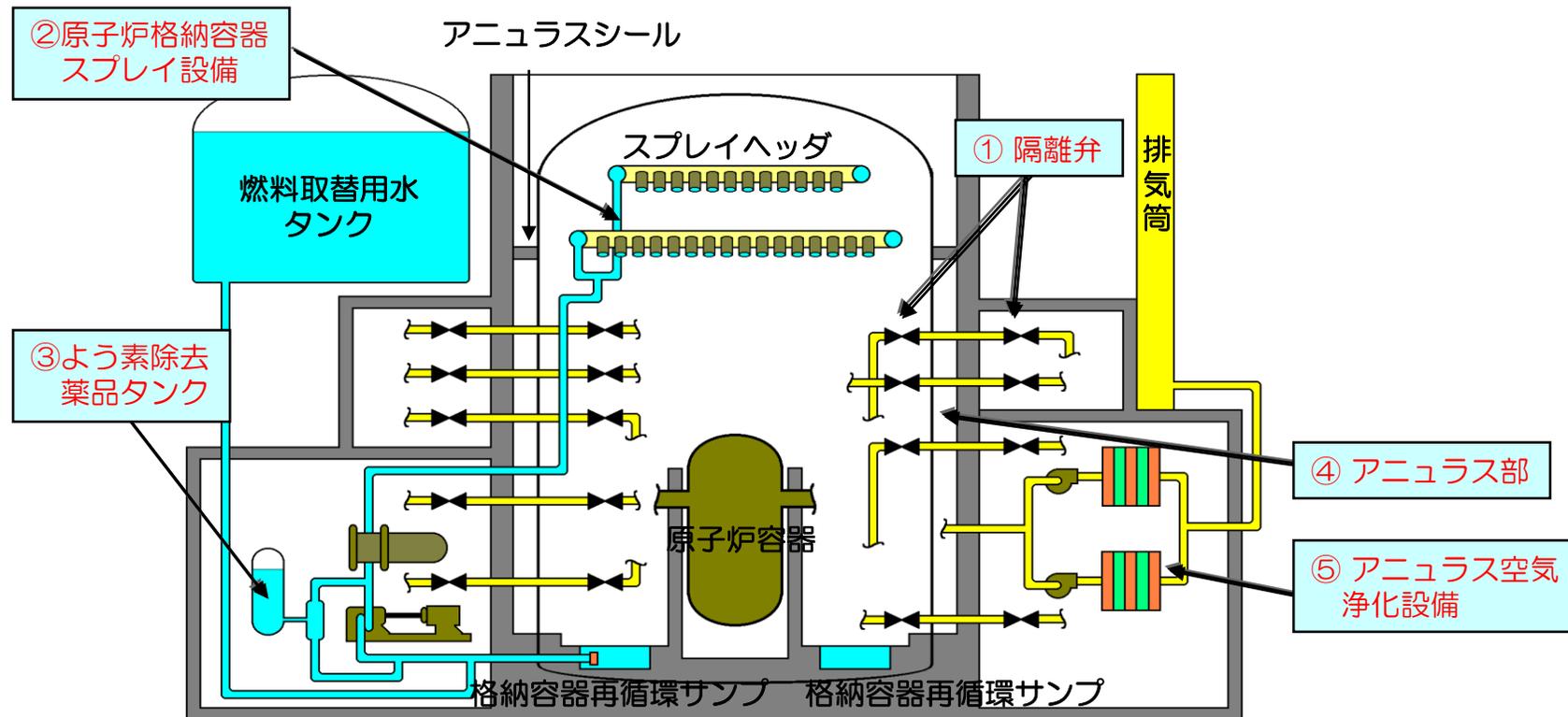
PWRの非常用炉心冷却系

冷やす



PWRの原子炉格納容器

閉じ込める



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～
- 具体的な原子力発電所の安全設備とはどういうものか
～ 緊急停止系、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器～
- **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

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)

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～
- 具体的な原子力発電所の安全設備とはどういうものか
～ 緊急停止系、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器～
- 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

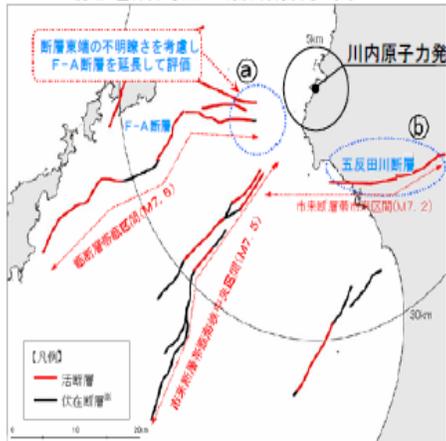
川内発電所 新規制基準対策(1/4)

地震対策の強化

地震の想定を厳しく見直し、地震対策を強化しました

- 発電所は、**活断層がない地盤に設置**していることを確認しました
- 発電所の建屋や機器の耐震安全性評価に用いる地震動(基準地震動)として、2つの地震動を設定しました
 - ① **基準地震動1(540ガル)**: 発電所周辺の活断層による地震を厳しく評価し設定※
 - ② **基準地震動2(620ガル)**: 過去に国内で発生した16地震のうち、2004年に発生した**北海道留萌支庁南部地震**を考慮し設定(追加)
- 配管の支持部を補強するなどの耐震補強工事を実施しており、留萌地震に対する耐震安全性も十分確保されることを確認しました

〔発電所周辺の活断層分布〕



※後期更新世以降(約12~13万年前以降)の活動がない断層

※ 発電所周辺の活断層を厳しく評価

- ① 想定より活断層が長いと仮定
- ② 地震調査研究推進本部(文部科学省に設置された政府機関)の評価を反映



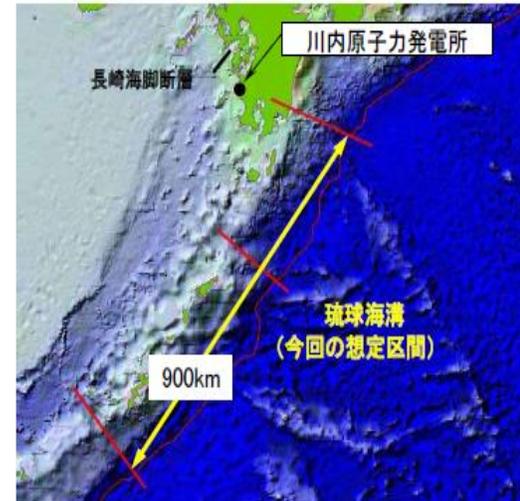
2つの基準地震動に対して、重要施設の安全機能を保持

津波対策の強化

津波の想定を厳しく見直し、津波対策を強化しました

- 最も厳しいケースとして、**琉球海溝のプレート間地震(マグニチュード9.1)**による津波を想定しました
 発電所での津波高さ: 海拔5m※程度(取水口付近)
 最大遡上高さ: 海拔6m程度(地震による地盤沈下や満潮位を考慮)
- 発電所の主要設備がある敷地は**海拔約13m**であり、津波に対し十分な余裕があることを確認しました
- 海水ポンプエリア(海拔約5m)の周辺に、防護壁(海拔約15m)を設置するとともに、津波の引き波時にも原子炉等の冷却に必要な海水を確保するための貯留堰を取水口前面に設置しました
- 更に、津波や漂流物に対する安全性を向上させるため、防護堤(海拔約8m)を設置しました

※ これまでは、長崎海脚断層の地震による津波を考慮し、海拔4m程度と評価



〔津波評価で想定した津波発生源〕



〔海水ポンプエリアの防水対策〕

川内発電所 新規制基準対策(2/4)

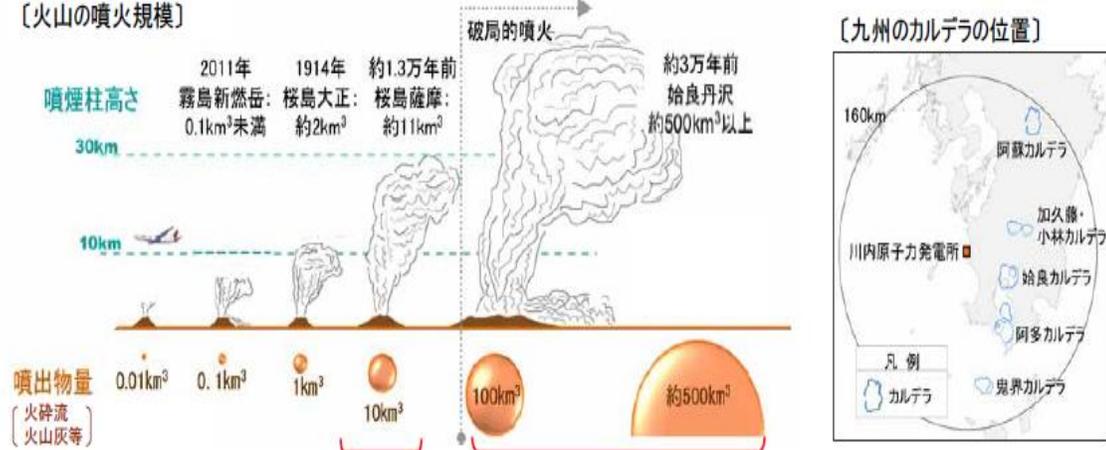
火山対策の強化

火山活動を定期的にモニタリングするなど、火山対策を強化します

- カルデラの破局的噴火(噴出物量 100km^3 以上)については、**発電所運用期間中に発生する可能性は、十分小さい**と評価※し、今後も状況に変化がないことを継続的に確認するため、**火山活動をモニタリング(監視・評価)**します
- モニタリングを行い、状況に変化が生じた場合には、早い段階で原子炉の運転を停止するなど、必要な措置を講じていきます
- 火山(降灰等)への対策として、約1.3万年前に発生した桜島薩摩噴火と同規模である厚さ15cmの火山灰の堆積を想定し、対策を実施しました

※桜島のある鹿児島地溝におけるカルデラの破局的噴火の活動間隔は約9万年であり、直近の破局的噴火は約3万年前である等

【火山の噴火規模】



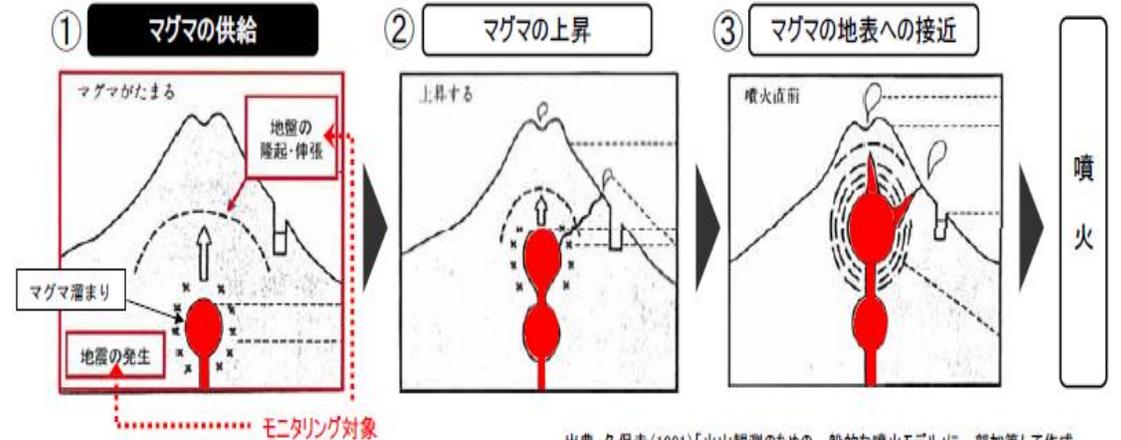
発電所運用期間中に考慮する最大の噴火 ⇒ 火山灰を想定した対策を実施

発電所運用期間中に発生する可能性は十分小さい ⇒ 火山活動を定期的にモニタリング

火山対策の強化 (火山活動モニタリングの概要)

- 一般的に噴火は、マグマ溜まりへのマグマの供給やマグマの上昇等を経て、噴火に至るとされ、破局的噴火においても、同様に長期間かけて進展すると考えられるため、最も早い段階である「①マグマの供給」時に現れる、地殻変動(地盤の隆起・伸張)及び地震活動をモニタリングの対象とします
- モニタリング結果の評価については、第三者の外部専門家から助言を得る仕組みを構築するとともに、新たな知見を収集し、評価手法の高度化に継続的に取り組んでいきます

【一般的な噴火】



出典:久保寺(1991)「火山観測のための一般的な噴火モデル」に一部加筆して作成

川内発電所 新規制基準対策(3/4)

竜巻対策の強化

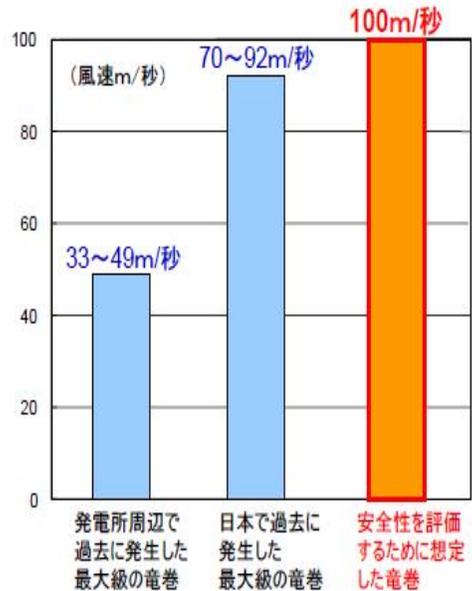
竜巻への対策を強化しました

- 日本で過去に発生した最大の竜巻を考慮して、最大風速100m/秒の竜巻を想定し、対策を実施しました
- 安全上重要な屋外設備を飛来物から守るため、防護ネットを設置するとともに、資材保管用コンテナを固縛するなど飛散防止対策を実施しました

〔竜巻対策の例示〕



〔想定した竜巻の風速比較〕

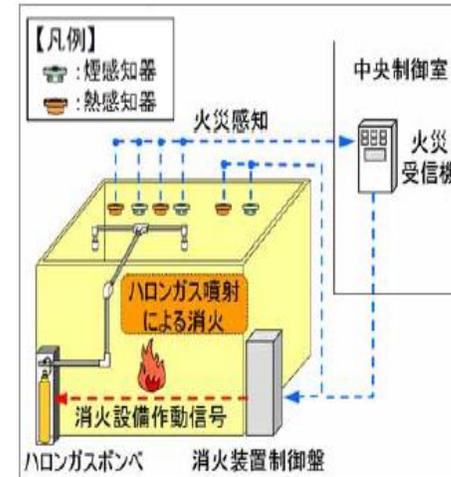


火災対策の強化

火災への対策を強化しました

- 火災により安全機能が喪失することがないよう、安全上重要な設備の設置エリアにおいて、検知方法の異なる火災感知器や延焼防止のための火災防護壁の設置など、火災を早期に感知・消火する対策等を強化しました

〔火災対策(火災感知器・自動消火設備)〕



川内発電所 新規制基準対策(4/4)

安全対策資機材等の発電所高台への主な分散配置状況 (1/2)



安全対策資機材等の発電所高台への主な分散配置状況 (2/2)



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～
- 具体的な原子力発電所の安全設備とはどういうものか
～ 緊急停止系、非常用炉心冷却系、原子炉格納容器～
- 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)

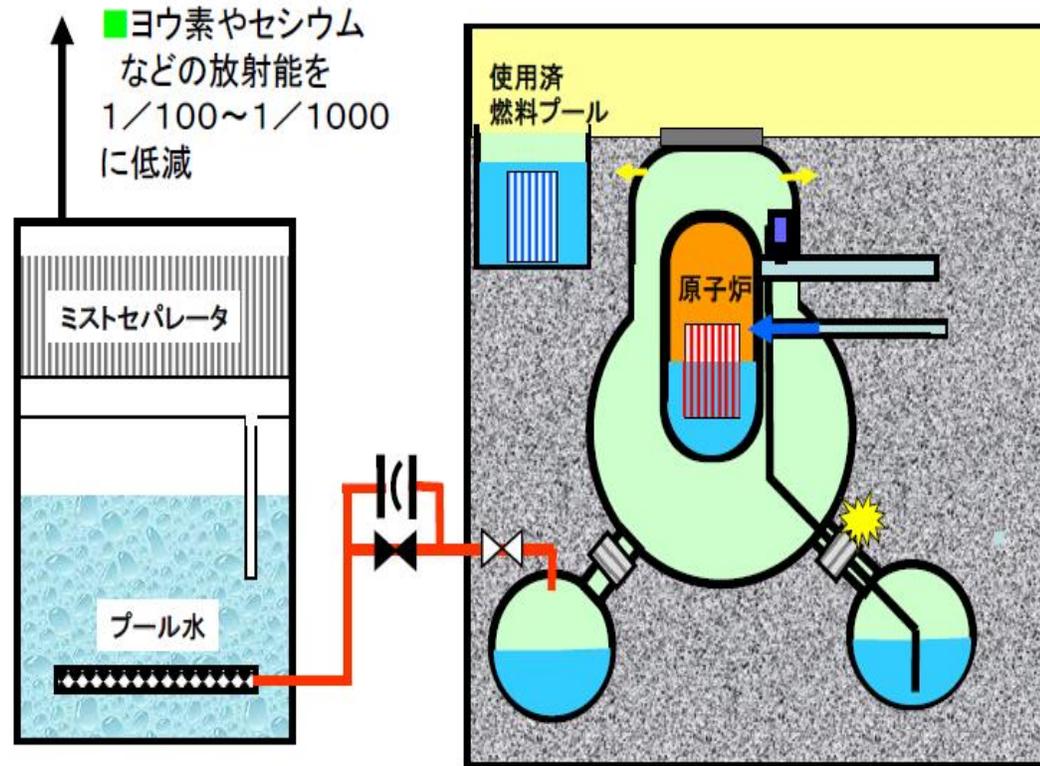
米国NRCの改善命令

- 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

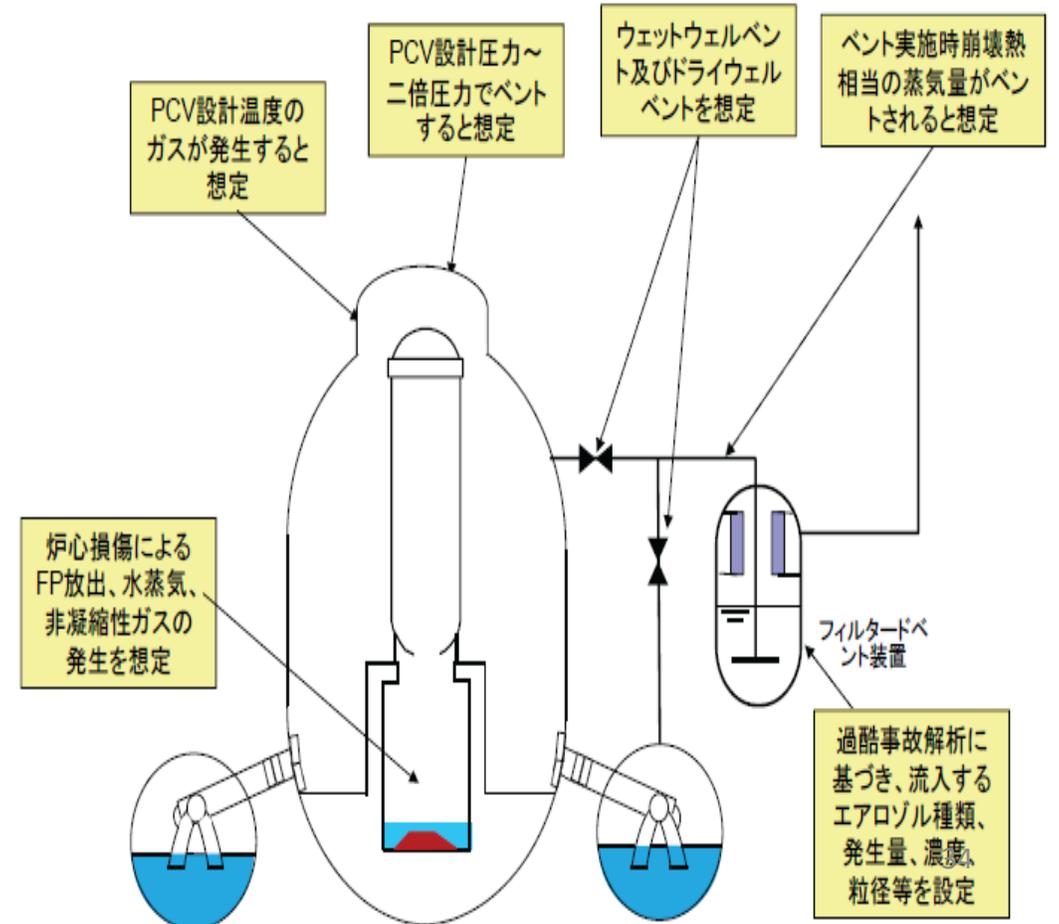
フィルタードベント(1/2)

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！